

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

**Návrh výměníku havarijního dochlazování jaderné elektrárny AP 1000
Westinghouse**

Proposal of Heat Exchanger for Emergency Cooling NPP AP 1000 Westinghouse

Vypracoval:

Bc. Kučera Jan

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Kučera**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh výměníku havarijního dochlazování jaderné elektrárny
AP 1000 Westinghouse
Proposal of Heat Exchanger for Emergency Cooling NPP
AP 1000 Westinghouse**

Zásady pro vypracování:

Navrhnete tepelný výměník havarijního dochlazování aktivní zóny. Na základě rešerže literatury popište koncepci a funkci pasivních systémů AP 1000 Westinghouse. Proveďte tepelný, hydraulický a pevnostní výpočet. Navrhnete optimální konstrukční tvar výměníku v souladu s teorií modelování.
Zadané parametry: elektrický výkon hrubý 1200 MWe; elektrický výkon čistý 1115 MWe; tepelný výkon 3415 MWt; teplota na vstupu/výstupu aktivní zóny 281/321 °C; průtok chladiva reaktorem 72 000 m³/hod; tlak na výstupu z reaktoru 15,5 MPa; tlak páry na výstupu z PG 5,76 MPa; parní výkon PG 6793 t/hod; teplota napájecí vody 227 °C.

Seznam doporučené odborné literatury:

HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03190-X.
MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně, 2001. ISBN 80-214-2028-6.
HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03324-4.

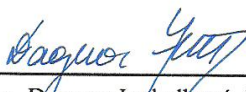
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Ostravě

.....

(podpis autora)

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jan Kučera

Adresa trvalého pobytu autora práce: Lichnov 102, okr. Nový Jičín, 74275

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KUČERA, J. Návrh výměníku havarijního dochlazování jaderné elektrárny AP1000 Westinghouse. Ostrava: Katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB- Technická univerzita Ostrava, 2013, 57 stran, Diplomová práce, vedoucí: Kolat, P.

Diplomová práce se zabývá problematikou pasivního chlazení jaderných elektráren a návrhem havarijního výměníku projektu AP1000 firmy Westinghouse. První část je zaměřena na popsání základního členění jaderné elektrárny, primárního a sekundárního okruhu. Dále popsání projektu firmy Westinghouse AP1000 a jeho bezpečnostních systémů. Následně je blíže popsána koncepce a funkce pasivních havarijních systémů AP1000.

Druhá část obsahuje teoretický rozbor a základní pevnostní, tepelné a hydraulické výpočty navrhovaného havarijního výměníku tepla, dle zadaných vstupních parametrů.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

KUČERA, J. Proposal of Heat Exchanger for Emergency Cooling NPP AP1000 Westinghouse. Ostrava: Department of Energy Engineering, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical university of Ostrava, 2013, 57 pages, Master thesis, supervizor: Kolat, P.

This diploma thesis deals with the topic of passive cooling of nuclear power plants and the design of emergency heat exchanger Westinghouse AP1000 . The first is focused on the description of basic segmentation of a nuclear power plant, the primary and second circuit. Consequently Westinghouse AP1000 project and its safety systems is introduced. Then the concept and functionality of passive emergency systems of AP1000 are described.

The second part consists of theoretical analysis and basic strength, thermal and hydraulic calculations of proposed emergency heat exchanger, based on given input parameters.

Obsah

1	Úvod	9
2	Jaderné elektrárny	10
2.1	Primární okruh jaderné elektrárny	11
2.2	Sekundární okruh jaderné elektrárny	12
2.3	Terciální okruh jaderné elektrárny	13
3	Jaderná elektrárna AP 1000 WESTINGHOUSE	14
3.1	Aktivní bezpečnostní systémy	18
3.2	Pasivní bezpečnostní systémy	18
4	Pasivní bezpečnostní systémy AP1000	20
4.1	Základní bezpečnostní systémy AP1000	21
4.2	Bezpečnost, hermetičnost kontejmentu	24
4.3	Pasivní systém chlazení kontejmentu	25
5	Principy řešení těžkých havárií AP1000	27
5.1	Havárie typu tavení aktivní zóny	27
5.2	Havárie typu LOCA	28
5.2.1	Kompenzátor objemu	28
5.2.2	CMT (vysokotlaké doplňování)	29
5.2.3	Odvod zbytkového tepla	30
5.2.4	Čtyřstupňové odtlakování systému	31
5.2.5	Hydroakumulátory (středotlaké doplňování)	31
5.2.6	IRWST (nizkotlaké doplňování chladiva)	32
5.3	Výpadek proudu - Black out	32
6	Pevnostní výpočet a kontrola	36
6.1	Pevnostní kontrola trubek	36
6.2	Konstrukce	38
7	Tepelný výpočet	39
7.1	Popis výměníků	39
7.2	Strana chlazeného média uvnitř trubek	39
7.3	Strana ohřívaného média v bazénu	42
8	Teplotní výpočet II. přiblížení	46
9	Hydraulický výpočet	49
10	Závěr	53
11	Seznam použité literatury	54
12	Seznam příloh	56

Seznam použitého značení, zkratk a jednotek

Značka	Popis	Jednotka
L_{str}	střední délka trubky	[m]
Nu	Nusseltovo kritérium	[1]
Pr	Prandtlovo kritérium	[1]
Re	Reynoldsovo kritérium	[1]
S	celková teoretická průtočná plocha	[m ²]
a	součinitel teplotní vodivosti	[m ² ·s ⁻¹]
c_p	tepelná kapacita	[kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
d_1	vnitřní průměr trubky	[m]
d_2	vnější průměr trubky	[m]
r_1	vnitřní poloměr trubky	[m]
r_2	vnější poloměr trubky	[m]
k	součinitel prostupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
l	délka	[m]
\dot{m}	hmotnostní tok média	[kg·s ⁻¹]
n	počet trubek	[1]
p	tlak	[MPa]
q	měrný tepelný tok	[W·m ⁻²]
t_1	vstupní teplota média chlazeného	[°C]

t_2	výstupní teplota média chlazeného	[°C]
t_b	teplota bazénu (nádrže)	[°C]
t_{str}	střední teplota stěny trubky	[°C]
t_{st}	střední teplota chlazeného média	[°C]
t_{s1}	povrchová teplota stěny trubky na straně I. média	[°C]
t_{s2}	povrchová teplota stěny trubky na straně II. média	[°C]
t_{trp}	teoretická střední teplota stěny trubky	[°C]
t_{trSt}	střední teplota stěny trubky	[°C]
w	rychlost proudění I. média	[m·s ⁻¹]
α	součinitel přestupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
η	dynamická viskozita média	[N·s·m ⁻²]
λ	součinitel tep. vodivosti média	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
ρ	hustota média	[kg·m ⁻³]
ν	kinematická viskozita média	[m ² ·s ⁻¹]
Re	mez kluzu	[MPa]
Rm	mez pevnosti	[MPa]

1. ÚVOD

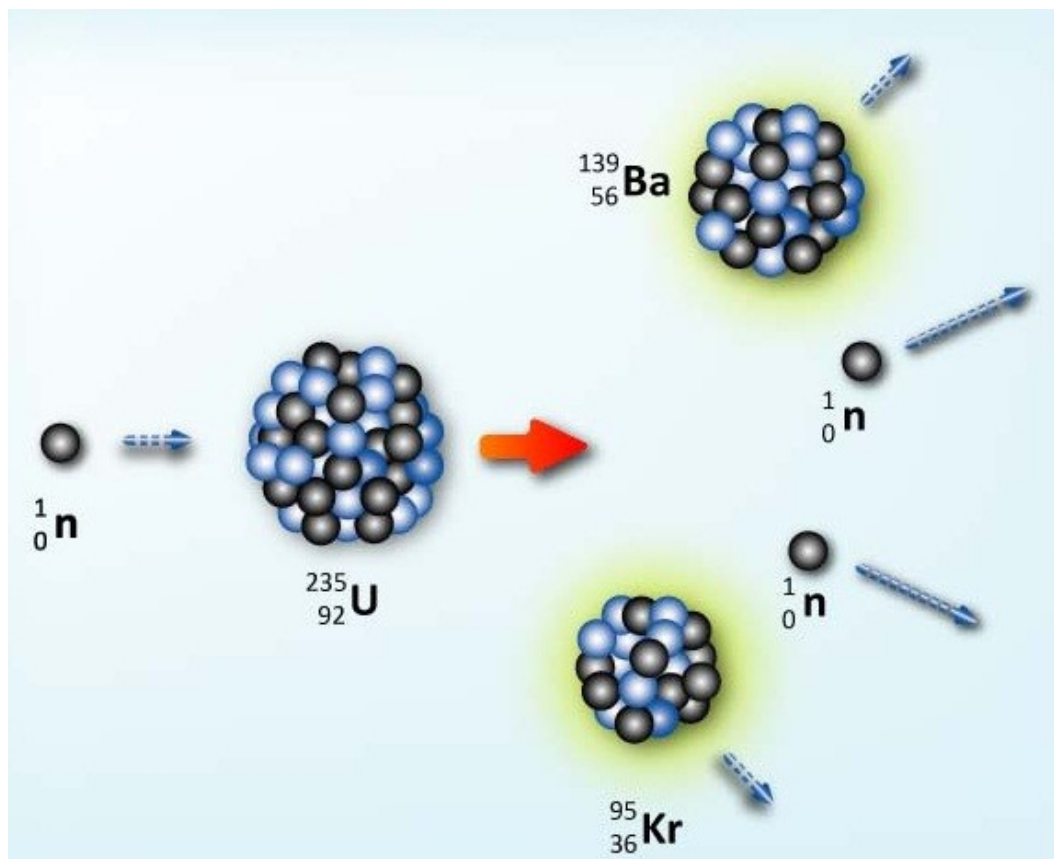
Potřeba energie je celosvětově rostoucí faktor. Snahou uspokojit tuto potřebu je neustálé snažení se o co největší využití možností výroby energie z různých druhů surovin, pomocí různých druhů technologií. Dnes jsou již technologie k získávání energie z různých druhů surovin známy a dochází k jejich zefektivnění. Nejmasověji je výroba energie zastoupena získáváním energie z fosilních zdrojů, jako je uhlí, ropa. Fosilní zdroje ovšem nejsou nevyčerpatelné, proto se technologie výroby energie zaměřily na zdroje jenž mají v menším množství mnohem větší energetický potenciál, jako uran a jeho využití v jaderných elektrárnách. Jaderná energetika je mnohem šetrnější k životnímu prostředí, než klasická fosilní energetika. Potenciál využití jaderného paliva není zdaleka u na vrcholu, jak je tomu u fosilních paliv. Jaderné palivo vyňaté z reaktoru obsahuje stále ještě 95 % nespotřebovaného uranu a proto je snaha o jeho maximální využití přepracováním.

Nevýhoda výroby elektřiny z jaderné energie se považuje dosud nedořešený konec palivového cyklu, tedy problém likvidace vyhořelého paliva. Další nevýhodou je možný katastrofický rozsah škod na životní prostředí v případné havárii typu černobylské jaderné elektrárny, nebo japonské elektrárny Fukušima.

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem tepelného výměníku havarijního dochlazování pro jadernou elektrárnu AP 1000 Westinghouse. Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části se zabývám jednotlivými částmi jaderné elektrárny, popisem projektu jaderné elektrárny AP100 firmy Westinghouse a bezpečnostní systémy, především pasivními, jaderné elektrárny AP1000. Druhá praktická část diplomové práce se zabývá návrhem havarijního výměníku, volbou materiálů, tepelným, hydraulickým a pevnostním výpočtem havarijního výměníku.

2. JADERNÉ ELEKTRÁRNY [1,2,11,12]

Jaderné elektrárny fungují na podobném principu, jako uhelné elektrárny. U obou typů elektráren vyrábí energii generátor, který je poháněn parní turbínou. V uhelné elektrárně je zapotřebí k vytvoření páry spalovat uhlí, v jaderné elektrárně se získává tepelná energie z jaderného paliva štěpnou reakcí. Štěpná reakce je zobrazena na obr. 2.1.



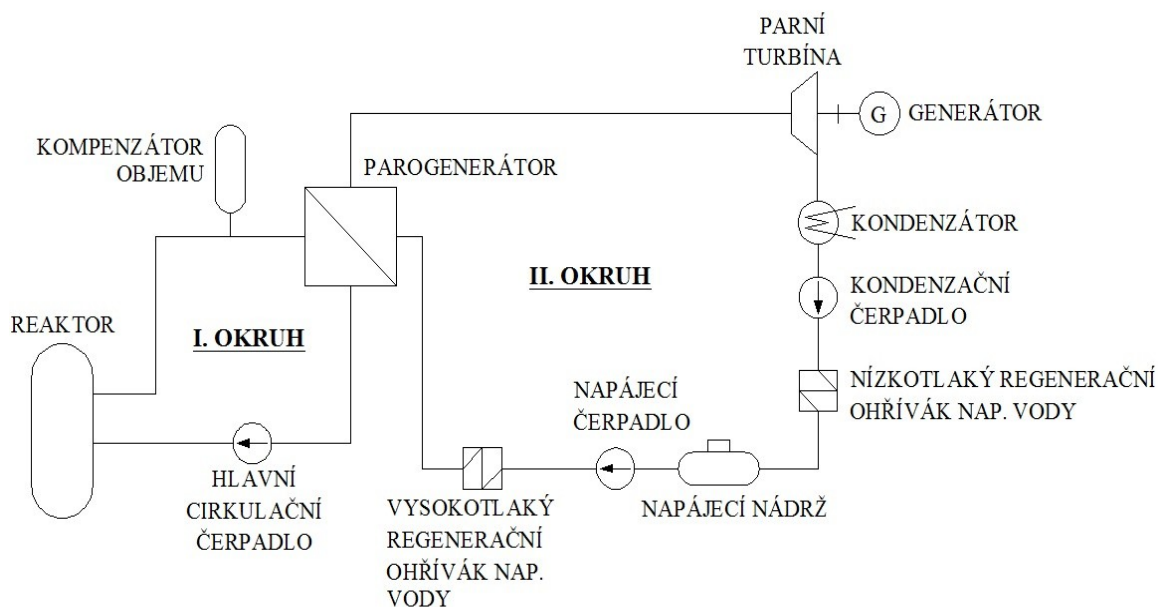
Obr. 2.1 Štěpná reakce [2]

Jaderné elektrárny jako palivo využívají obohacený uran, který je od přírodního uranu navýšen obsahem izotopu ^{235}U z 0,7% od 2 do 30%.

U štěpení máme vždy dva až tři rychlé neutrony, v případě že by nebyly moderovány mohlo by dojít k mohutné neřízené řetězové reakci. Proto je nutné ke zpomalení neutronů použít tzv. moderátor, jako grafit, nebo nejčastěji používaná voda, která zároveň slouží jako chladivo. Pro regulaci štěpné reakce slouží regulační tyče, které absorbují neutrony.

Většina jaderných elektráren má dva hlavní okruhy (viz obr. 2.2):

- primární
- sekundární



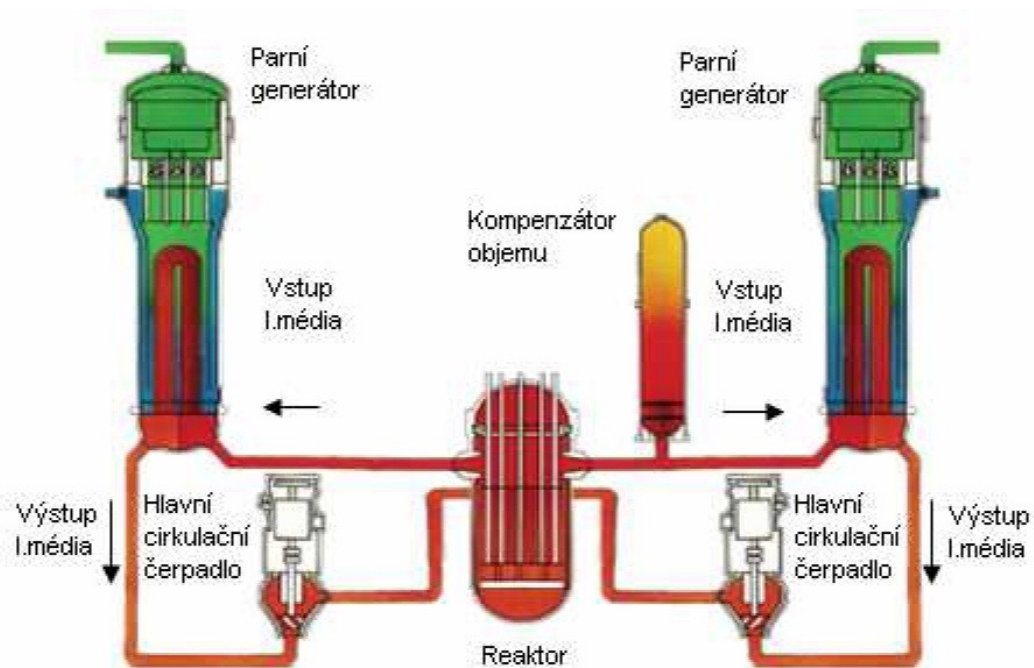
Obr. 2.2 Schéma jaderné elektrárny [1]

2.1 PRIMÁRNÍ OKRUH JADERNÉ ELEKTRÁRNY [1, 16]

Je systém zařízení, který umožňuje získávat tepelnou energii z jaderného paliva prostřednictvím řízené štěpné řetězové reakce, nepřetržitě ji pomocí chladiva odvádět a přeměnit ji na formu tepelné energie využitelné v parní turbíně.

Základními zařízeními tohoto okruhu jsou:

- reaktor
- parogenerátor
- hlavní cirkulační čerpadla
- cirkulační potrubí primárního okruhu
- kompenzátor objemu
- bezpečnostní a havarijní systémy



Obr. 2.3 Dvousmyčkové uspořádání prim. okruhu [1]

V primárním okruhu se z jaderného paliva pomocí štěpné řetězové reakce uvolňuje tepelná energie, která předává své teplo chladivu primárního okruhu, kterým je voda. Tento proces se odehrává v jaderném reaktoru. Z reaktoru proudí ohřáté chladivo hlavním cirkulačním potrubím do parogenerátoru, kde akumulované teplo z teplosměnných ploch trubek předává teplo sekundárnímu okruhu. Z parogenerátoru jde chladivo do hlavního cirkulačního čerpadla a odtud zpátky do reaktoru.

2.2 SEKUNDÁRNÍ OKRUH JADERNÉ ELEKTRÁRNY [1, 16]

Je systém zařízení, který umožňuje přeměnit tepelnou energii získanou v primárním okruhu na mechanickou energii rotoru parní turbíny. V parních generátorech se vytváří pára, která pohání turbínu.

Základními zařízeními tohoto okruhu jsou:

- Parní turbíny
- kondenzátor
- kondenzační a napájecí čerpadla
- regenerační ohříváky



Obr. 2.4 Odkrytované části parní turbíny [1]

2.3 TERCIÁLNÍ OKRUH JADERNÉ ELEKTRÁRNY [1, 16]

Funkcí terciárního okruhu je vytvořit v kondenzátoru co největší podtlak, aby účinnost turbíny byla co největší. Podtlak se dosahuje co nejnižší teplotou chladicí vody.

Základními zařízeními tohoto okruhu jsou:

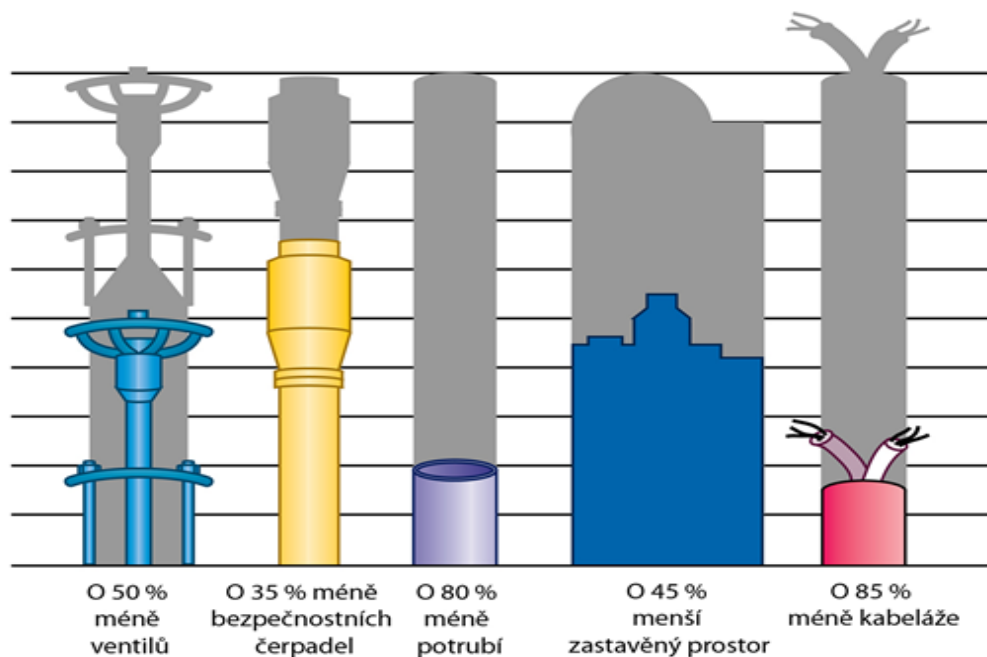
- chladicí věže
- oběhová čerpadla
- potrubí a kanály chladicí vody



Obr. 2.5 Chladicí věže [1]

3. JADERNÁ ELEKTRÁRNA AP 1000 WESTINGHOUSE [5, 17, 18]

Konstrukční řešení jaderné elektrárny s reaktorem AP1000 je odvozen z projektu AP 600 (obr. 3.3), který byl jako jeden z prvních reaktorů třetí generace. AP1000 je projektem se značnými inovativními prvky, především bezpečnostními. Vyzdvihována je především pasivní ochrana, fungující bez zásahu operátora. Projekt AP1000 je také charakteristickým snížením počtu komponent celé jaderné elektrárny.

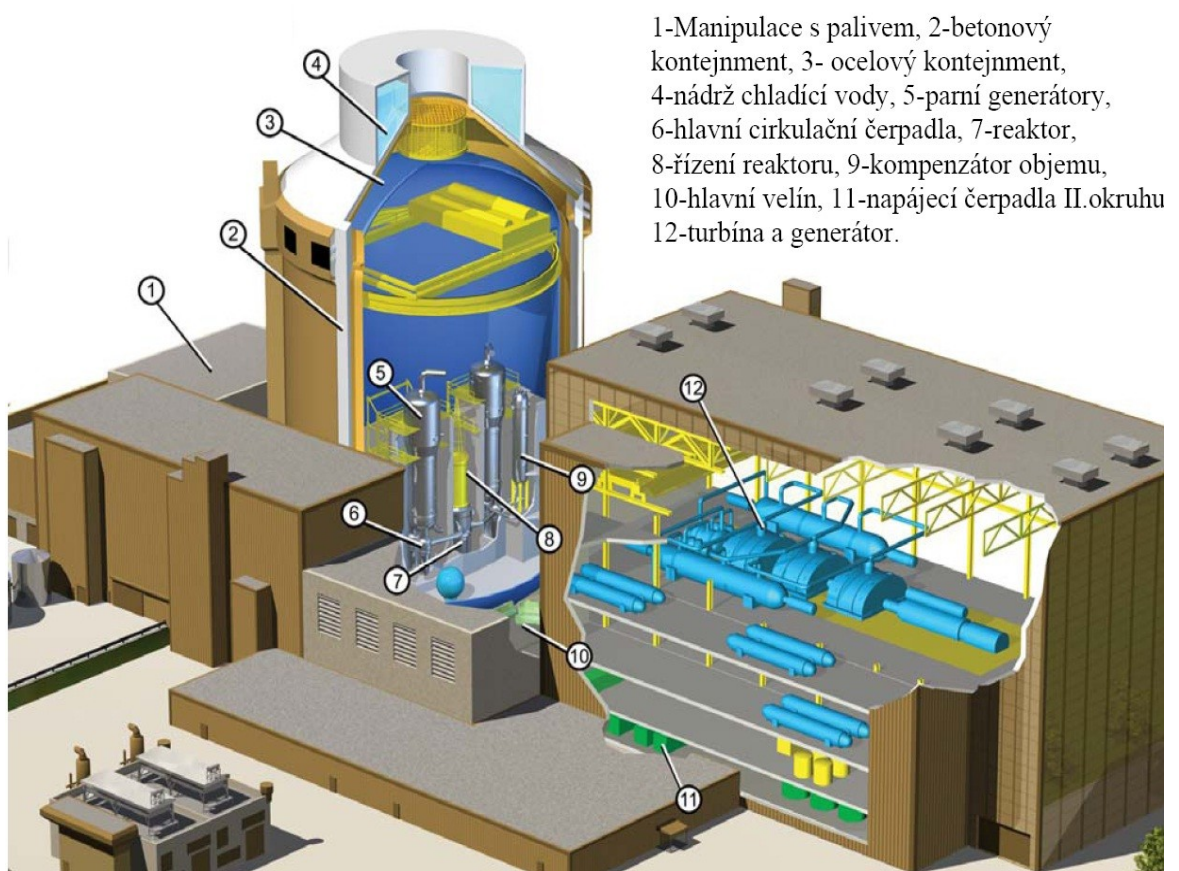


Obr. 3.1 Grafické znázornění snížení počtu komponentů AP1000 [5]

Z obr. 3.1 je vidět o kolik procent se snížilo množství různých komponent JE s reaktorem AP1000. Nejvíce ubylo kabeláže a potrubí. U těchto dvou komponent dosáhl pokles množství až o 85 % původního množství, které bylo použito u JE s reaktorem PWR (1000 MW).

Společnost Westinghouse vyzdvihuje, jako obrovskou výhodu modulární způsob výstavby jaderné elektrárny. Modulární výstavbou se rozumí, že elektrárna je budována jako stavebnice z dílů, vyrobených jinde a následně je sestavovat na staveništi. Což šetří čas a peníze, jelikož jednotlivé kusy je možné vyrábět souběžně.

První bloky jaderné elektrárny AP1000 jsou stavěny v Sanmenu – Čína. Výrobu provádí společnost Doosan Heavy Industries & Construction v Jižní Koreji.



Obr. 3.2 Konceptní uspořádání jaderné elektrárny Westinghouse AP 1000 [1]

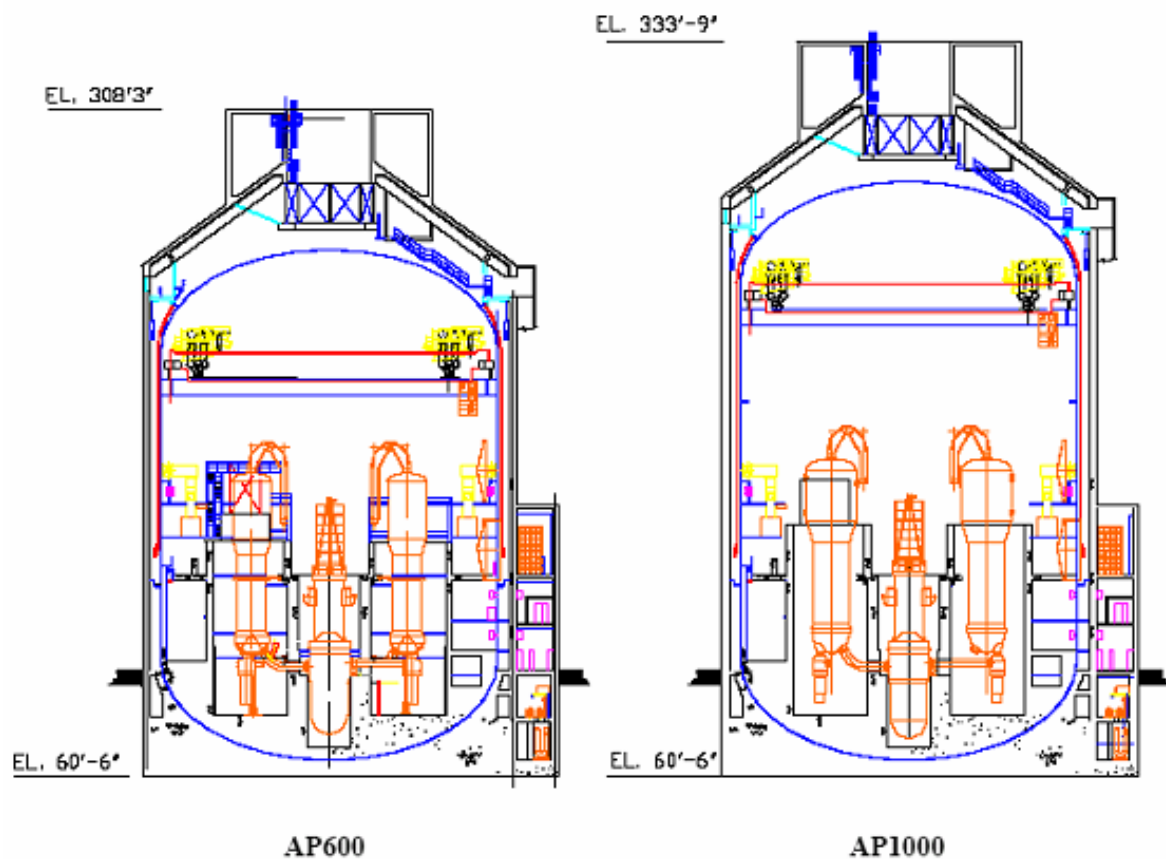
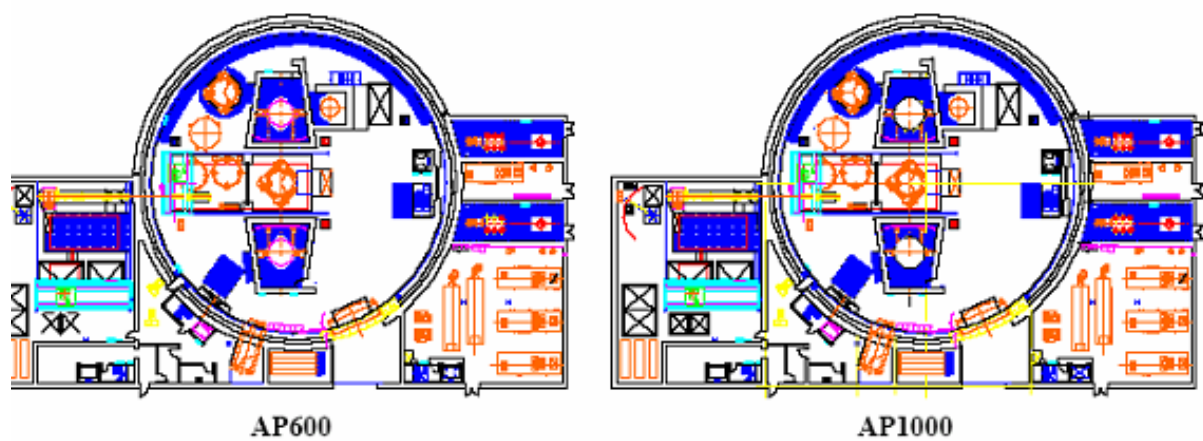


Figure 3.2 Comparison of AP600 and AP1000 Plants (Sec. 3.2a)



Obr. 3.3 Porovnání zastavěné plochy a objemu AP600 a AP1000 [1]

Tab. 3.1 Technické údaje jaderné elektrárny AP 1000 [1]

<u>Jaderná elektrárna</u>	AP 1000	Jednotka
Tepelný výkon jaderné elektrárny	3415	[MWt]
Instalovaný výkon	1117	[MWe]
Účinnost JE	32,7	[%]
Projektová životnost	60	[let]
<u>Primární okruh</u>		
Počet smyček	2	[1]
Tlak páry v parogenerátoru	7,8	[MPa]
Tlak v primárním okruhu	16,2	[MPa]
Teplota na vstupu do reaktoru	298,5	[°C]
Teplota na výstupu z reaktoru	330,7	[°C]
Počet palivových souborů	157	[1]
Počet regulačních tyčí	53	[1]
Počet absorpčních tyčí	16	[1]
Palivový cyklus	18	[měsíců]
<u>Sekundární okruh</u>		
Počet turbogenerátorů	1	[1]
Počet dílů turbíny	1	vysokotlaký
	3	nízkotlaké
Otáčky	1500	[ot·min ⁻¹]

3.1 AKTIVNÍ BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY [1, 5]

Aktivní bezpečnostní systémy jsou v projektu AP 1000 klasifikovány jako systémy, které se nepodílejí na řešení havarijních stavů. Jsou to systémy klasifikovány, jako systém pro normální provoz a jsou řízeny pomocí kvalifikovaných operátorů. Do pole působnosti aktivních bezpečnostních systémů dále patří zajištění bezpečnosti, při přechodových jevech a méně významných událostech dle stupnice INES (INES – The International Nuclear Event Scale). Tyto nebezpečnostní systémy jsou konstruovány a provozovány tak, že nevyžadují tak časté kontroly, není nutná častá údržba a testování. Údržba je možná i během provozu.

Příklady aktivních bezpečnostních systémů

- systém normálního doplňování primárního okruhu
- systém odvodu zbytkového tepla při normálním provozu
- systém pro kontrolu obsahu vodíku v kontejmentu
- pomocné systémy napájecí vody
- absorpční tyče šedé a černé pro řízení reaktivity za normálního provozu
- klimatizace, ventilace, vytápění

Pro případ havárie, kdy není k dispozici elektrická energie vyrobená v jaderné elektrárně, jsou tyto systémy zálohovány diesel-generátory či akumulacími bateriemi.

3.2 PASIVNÍ BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY [1,5]

Pasivní bezpečnostní systémy jsou bezpečnostní systémy, které jsou nezávislé na vnitřních a vnějších zdrojích elektrické energie a na činnosti člověka. Je to její největší výhoda, která zároveň významně snižuje pravděpodobnost vzniku havárií díky tomu, že nemůže dojít k selhání funkce systému či selhání člověka. Při těžkých haváriích není nutný zásah operátora, aby elektrárnu bezpečně odstavil po dobu 72 hodin. Avšak u těchto systémů existuje určitá závislost na aktivních systémech. Jedná se o armatury, které uvádějí do chodu pasivní systémy. Tyto armatury jsou konstruovány tak, aby se aktivovaly v případě ztráty vlastní energie či v případě přijetí signálu vyžadující jejich aktivování.

Tyto bezpečnostní systémy zároveň přinesly zjednodušený design a tím úsporu oproti standardnímu tlakovodnímu reaktoru. Nainstalováno je o 50 % méně bezpečnostních

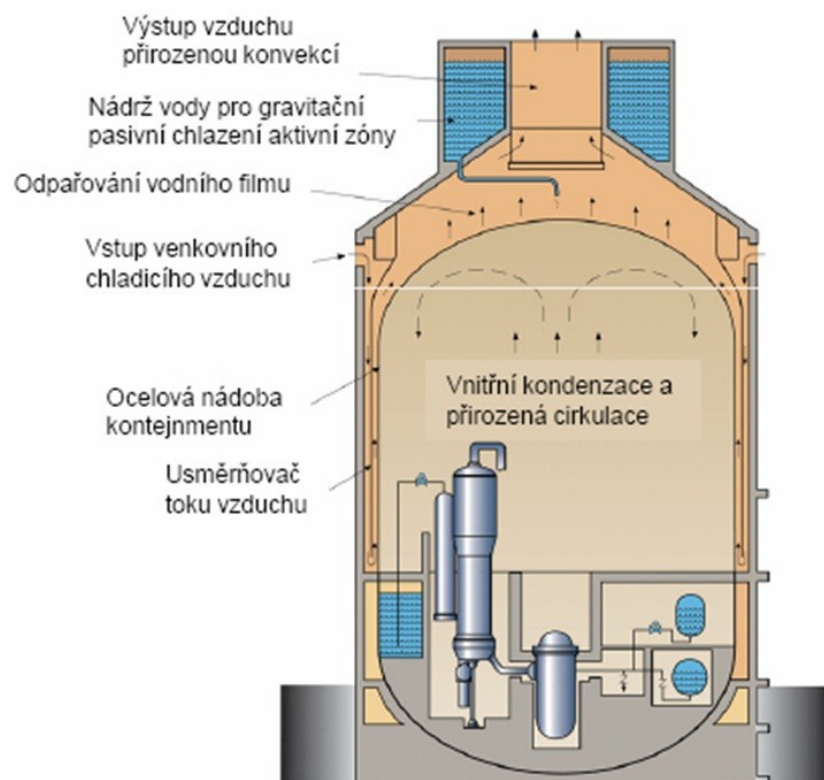
ventilů, o 35 % méně čerpadel, o 80 % méně vzduchotechniky a potrubí, o 70 % méně kabeláže pro účely řízení a o 45 % menší zastavěný prostor.

Příklady pasivních bezpečnostních systémů

- pasivní systém chlazení aktivní zóny
- hermetičnost kontejmentu
- pasivní systém chlazení kontejmentu

Pasivní systém chlazení aktivní zóny plní dvě hlavní funkce

- bezpečné chlazení aktivní zóny
- zajištění odvodu zbytkového tepla z reaktoru



Obr. 3.3 Systém pasivního chlazení kontejmentu AP1000 [18]

4. PASIVNÍ BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY AP1000 [1, 13, 19, 20, 24]

V posledních letech se do popředí zájmu prosazují systémy pasivních bezpečnostních prvků. Pasivní systémy, jsou schopny zajistit řešení především havarijních stavů, bez potřeby zdroje energie. Což je velikou výhodou v porovnání pasivních bezpečnostních systémů s aktivními bezpečnostními systémy. První pasivní bezpečnostní systémy lze pozorovat již u reaktorů druhé generace. Jako příklad lze uvést použití havarijních tyčí, které při přerušení dodávky elektřiny (tyče drženy elektromagnety) spadnou vlivem gravitace do aktivní zóny. Dalším pasivním bezpečnostním systémem je systém hydroakumulátorů připojených na primární potrubí, pro dodávání chladiva. U novějších generací reaktorů jsou pasivní bezpečnostní systémy rozšířeny více.

Mezi pasivní bezpečnostní systémy řadíme např. dvojitý kontejment, jehož funkcí, z hlediska odvodu zbytkového tepla z kontejmentu, je pasivní chlazení vnitřní obálky přirozenou cirkulací vzduchu. Díky tomu odpadá řada různých tepelných výměníků a potrubí. Dalším pasivním bezpečnostním systémem je systém havarijního doplňování primárního okruhu. Obsahuje výše zmíněné hydrokumulátory poháněné stlačeným vzduchem, ale také tzv. core makeup tanks, které jsou za provozu naplněny chladivem na stejný tlak jako je v primárním okruhu a v případě snížení tlaku v něm automaticky doplňují chladivo. Opět odpadá řada čerpadel, potrubí a jiných komponent. Dalším typem pasivní ochrany je například samovolné proudění chladiva. V případě poruchy hlavních cirkulačních čerpadel, by chladivo přirozeně proudilo vlivem rozdílů teplot. Rychlost takového proudění by byla sice podstatně menší, ovšem aktivní zónu by to uchladiło, dokud by nebyly hlavní cirkulační čerpadla opět opraveny. Tento způsob chlazení se uvažuje u reaktorů generace IV, konkrétně u olovem chlazeného reaktoru, který dokonce nebude používat hlavní cirkulační čerpadla. Stejný reaktor a navíc i reaktor chlazený kapalnými roztoky některých solí má nespornou výhodu při havárii typu LOCA (prasknutí primárního potrubí).

Hlavními výhodami pasivních systému je, že fungují zcela přirozeně na principu základních a jednoduchých fyzikálních zákonů (např. gravitace). A jelikož fyzikální zákony jsou neměnné a jasně dané v našem časoprostoru, lze očekávat, že pasivní systémy budou vždy fungovat i bez zásahu operátora, což výrazně zvyšuje bezpečnost.

Problémem je, jak pasivní systémy testovat. Těžko se bude na novém reaktoru simulovat například havárie typu LOCA, aby se vyzkoušel systém přirozené cirkulace v případě dvojitého kontejmentu. Také ne všechny pasivní systémy jsou plně nezávislé a některé jsou závislé právě na aktivních či poloaktivních prvcích.

4.1 ZÁKLADNÍ BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY AP1000 [6, 8, 13, 14]

Integrální součástí bezpečnosti projektu AP1000 je ochrana do hloubky. K ochraně do hloubky přispívají především nebezpečnostní systémy, pasivní bezpečnostní systémy, zachycení roztavené aktivní zóny v reaktorové nádobě a minimální únik produktů štěpení. Bezpečnost projektu AP1000 se rovněž opírá o zkušenosti z provozu současných reaktorů, výzkumné činnosti či požadavky mezinárodních organizací (IAEA, EUR, u AP1000 i US NRC).

Funkci bezpečného chlazení aktivní zóny zajišťují především tyto systémy:

-Core makeup tanks – CMT

-Přídavné zásobní nádrže pro chlazení aktivní zóny



Obr. 4.1 CMT zásobní nádrž [21]

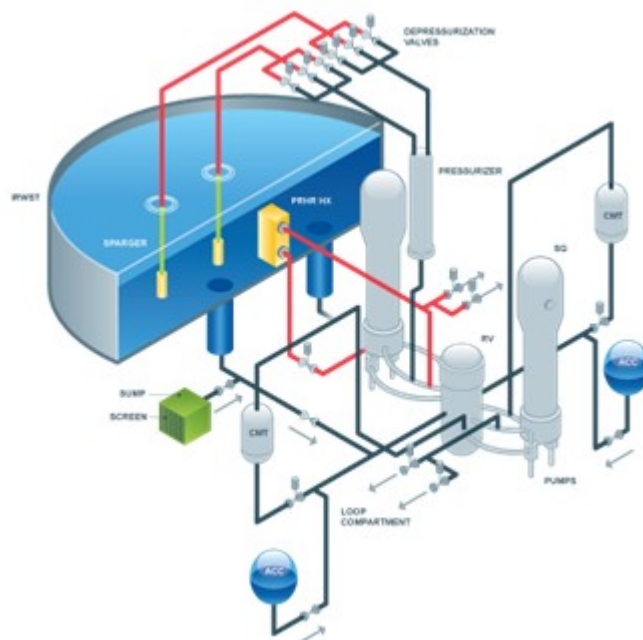
- Accumulators**
- hydroakumulátory



Obr. 4.2 Hydroakumulátor [21]

-In-containment refueling water storage tank – IRWST

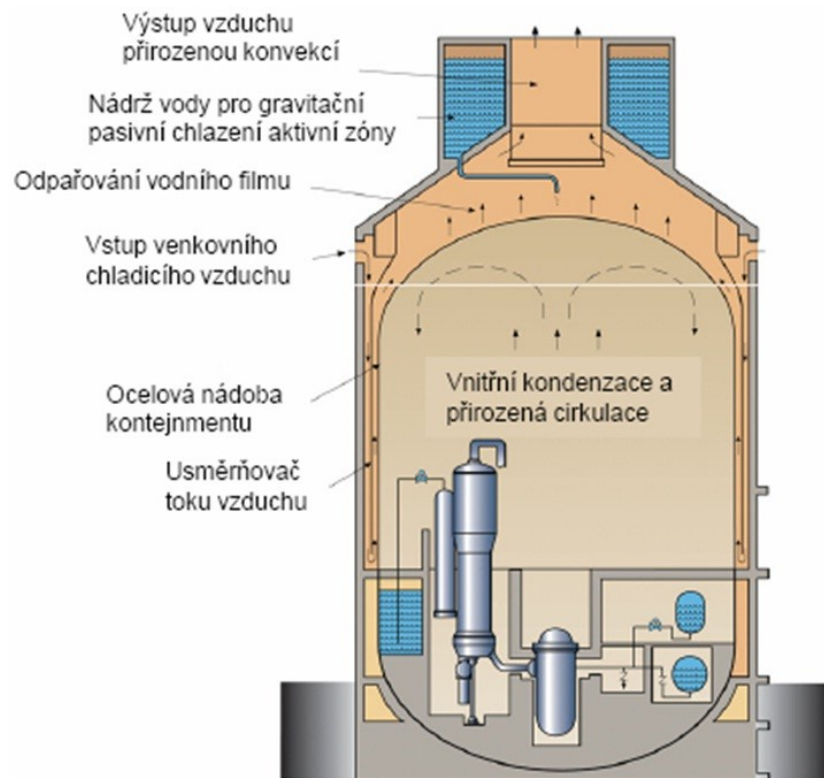
-zásobní nádrž vody pro výměnu paliva umístěná v kontejmentu – slouží i jako zásobní nádrž pro havarijní chlazení při LOCA a jímka kontejmentu



Obr. 4.3 Schema zapojení zásobní nádrže IRWST [5]

-In-containment passive long-term recirculation

-recirkulace vzduchu uvnitř kontejmentu



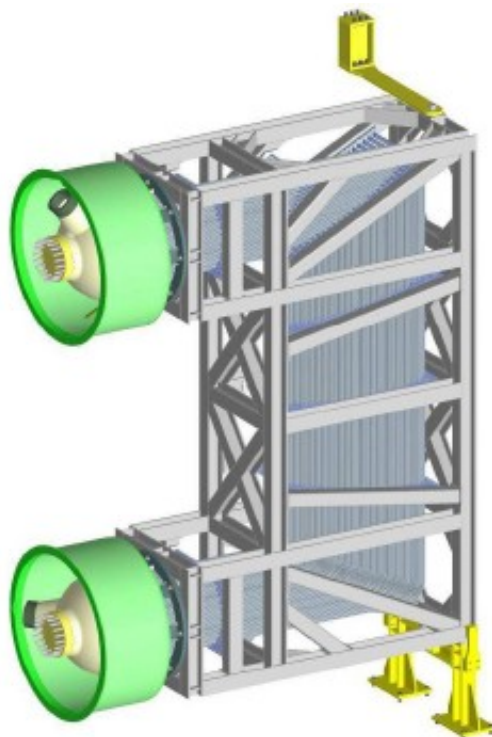
Obr. 4.4 Znáznornění recirkulace vzduchu v kontejmentu [1]

Funkci zajištění odvodu zbytkového tepla z reaktoru zajišťují hlavně tyto systémy a zařízení:

-In-containment refueling water storage tank – IRWST (obr. 4.3)

-Zásobní nádrž vody pro výměnu paliva umístěná v kontejmentu – slouží i jako zásobní nádrž pro havarijní chlazení při LOCA a jímka kontejmentu

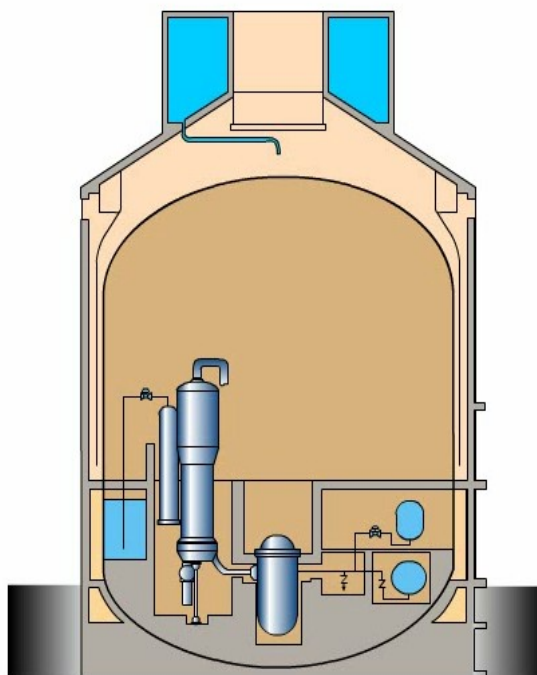
Passive residual heat removal heat exchangers – PRHR HX (Obr. 4.4)
Pasivní výměník tepla, pro odvod zbytkového tepla



Obr. 4.4 Pasivní výměník tepla PRHR HX [21]

4.2 BEZPEČNOST, HERMETIČNOST KONTEJMENTU [6, 8, 13, 14, 18]

Základní funkcí kontejmentu je, že umožňuje izolovat únik radioaktivních produktů štěpení a ionizujícího záření do životního prostředí. V případě havárie, kdy hrozí únik jak plyných, tak kapalných radioaktivních látek, je kontejment konstruován tak, aby k úniku nemohlo dojít. Tudiž je kontejment hermeticky těsný. Kontejment je konstruován na přetlak 0,407MPa a jeho chlazení je zajištěno pomocí pasivních bezpečnostních systémů (přirozená cirkulace vzduchu, gravitační chlazení vodou z nádrží umístěných na střeše kontejmentu). Bezpečnost kontejmentu je taktéž zajištěna proti vnějším vlivům či účinkům, které se nedají vyloučit. Mezi vnější vlivy jsou uvažovány především přírodní jevy nezpůsobené člověkem. Kontejment je odolný vůči zemětřesení, pádu letadla, požáru a různým bouřím.



Obr. 4.5 Kontejment AP1000 [1]

4.3 PASIVNÍ SYSTÉM CHLAZENÍ KONTEJMENTU [6, 8, 13, 14, 18]

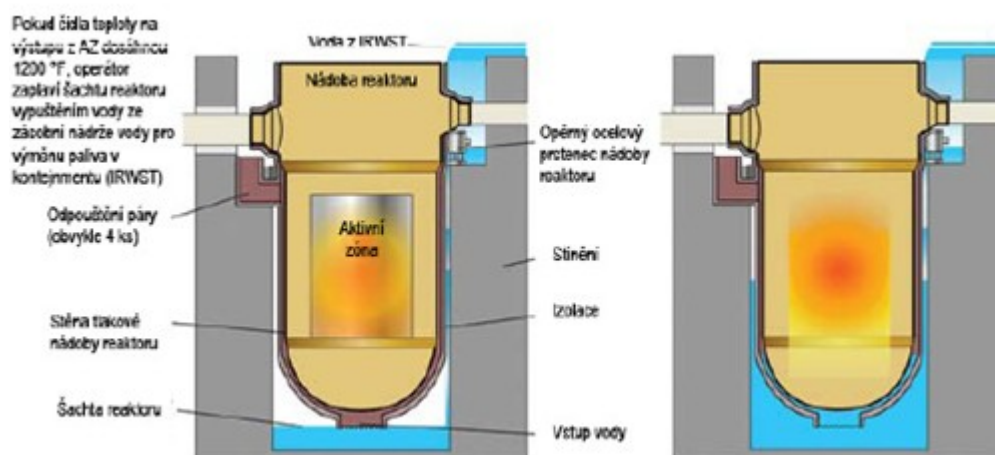
Pro udržení hermetičnosti, proti přehřátí a překročení projektového tlaku slouží systém chlazení kontejmentu, který je taktéž pasivní. Mezi železobetonovým a ocelovým kontejmentem je zaveden systém přirozené cirkulace vzduchu, která funguje i za běžného provozu. Studený vzduch se nasává několika otvory umístěnými v horní části stěny kontejmentu, proudí směrem dolů mezi betonovou obálkou a přepážkou a následně nahoru mezi ocelovou stěnou a přepážkou. Funkcí této vzduchové přepážky je, že zaručuje chlazení ocelové obálky kontejmentu po celém obvodu. Pokud by nebyla mezi ocelovou obálkou a železobetonovou stěnou oddělující přepážka, vzduch by proudil pouze v horní části a prakticky by nic neochladil. Ohřátý vzduch se pohybuje směrem ke komínu a tzv. komínovým efektem je zajištěn odvod ohřátého vzduchu. Teplo z kontejmentu je předáváno vzduchu pomocí přirozené konvekce přes ocelovou stěnu. Současně je kolem komínu umístěna nádrž pro gravitační sprchování ocelové obálky v případě těžké havárie, kdy se v kontejmentu vyvine velké množství tepla. Kromě odvodu zbytkového tepla je funkcí těchto systémů snižování tlaku v kontejmentu, což je důležité mimo jiné pro udržení celistvosti ocelové obálky kontejmentu a tudíž zadržení radioaktivních látek a ionizujícího záření uvnitř kontejmentu. Další funkcí je, že díky

vnějšímu chlazení kontejmentu kondenzuje vznikající pára. Kondenzát následně stéká do IRWST. Systém gravitačního sprchování ocelové obálky a přirozené cirkulace vzduchu je nastaven tak, že když je překročena mezní hodnota přetlaku v kontejmentu, armatury (jsou umístěny na potrubí vedoucí z nádrže nad ocelovou obálku kontejmentu) se otevřou a voda proudí gravitačním spádem na ocelovou obálku. Voda stéká po ploše ocelové obálky kontejmentu, přičemž se postupně se vypařuje. Objem vody v nádržích vystačí chladiť kontejment tři dny (v případě nadprojektové havárie), přičemž během těchto dní je možnost nádrží postupně doplňovat z externích zdrojů. Existuje možnost, že nebude možné nádrží doplňovat a voda se po třech dnech zcela vyčerpá. V tomto případě v kontejmentu vzroste tlak ovšem pouze na hodnotu 90 % projektového tlaku a navíc po třech dnech je systém přirozené cirkulace vzduchu schopen sám uchladiť ocelovou obálku.

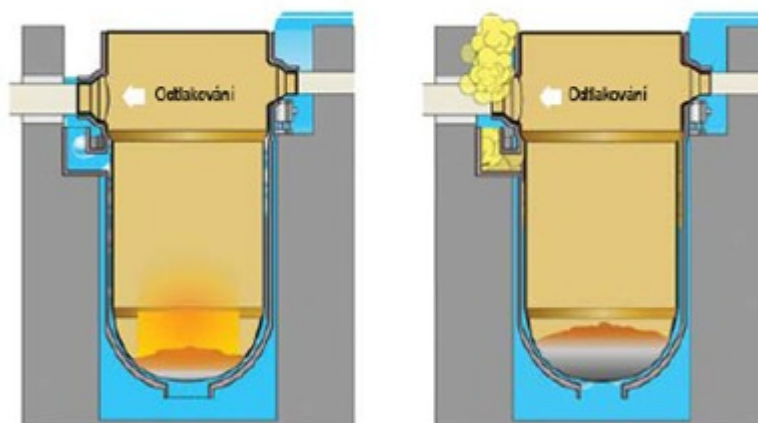
5. PRINCIPY ŘEŠENÍ TĚŽKÝCH HAVÁRIÍ AP1000 [13, 14, 15]

5.1 HAVÁRIE TYPU TAVENÍ AKTIVNÍ ZÓNY [13, 14, 15]

Projekt AP1000 řeší havárii typu tavení aktivní zóny zcela odlišným způsobem než projekt EPR a MIR-1200. Zatímco tyto projekty řeší takovou havárii pomocí lapače roztavené aktivní zóny, projekt AP-1000 řeší tuto havárii zachycením taveniny uvnitř reaktorové nádoby s následným vnějším chlazením a únikem vzniklých radioaktivních plynných látek do atmosféry kontejmentu. Princip řešení havárie s tavením aktivní zóny pro projekt AP1000 je zobrazen na obrázku 5.1 a 5.2.



Obr. 5.1 Princip řešení havárie tavení aktivní zóny [6]



Obr. 5.2 Princip řešení havárie tavení aktivní zóny [6]

Jakmile dojde k havárii s tavením aktivní zóny (při teplotě v aktivní zóně od 649°C), jsou otevřeny armatury IRWST a chladicí médium proudí do prostoru mezi betonovým základem a reaktorovou nádobou (do šachty reaktoru). Při přítoku vody se zaplní dno a postupně voda dosáhne až do bodu, kdy vstupuje do tepelné izolace, která izoluje reaktorovou nádobu od šachty reaktoru. Voda stoupá mezi stěnou tepelné izolace a stěnou reaktoru a chladí reaktor z vnější strany. Vzniká pára, která prostorem kolem nátrubků reaktoru stoupá do volného prostoru kontejmentu. Zároveň je zaplaven reaktor i samotný a dochází k chlazení taveniny přímým stykem vody s taveninou. Vzniklá pára opět stoupá přes systém odtlačování v kompenzátoru objemu do kontejmentu (je-li primární okruh celistvý). Pomocí vnějšího chlazení ocelové obálky kontejmentu pára kondenzuje a kondenzát stéká zpět do IRWST. Tento systém chlazení reaktoru při havárii typu tavení aktivní zóny je dostatečné k tomu, aby roztavená aktivní zóna nepoškodila ocelovou tlakovou nádobu reaktoru a tím pádem neunikla do kontejmentu. Díky udržení roztavené aktivní zóny v reaktorové nádobě nedojde k dalším nežádoucím jevům, které by vznikly v případě, že by aktivní zóna roztavila tlakovou nádobu reaktoru. Nedojde tedy situaci, že by mohlo dojít k explozi či reakci roztavené aktivní zóny s betonovým základem, kde je umístěna reaktorová nádoba, či dokonce k úniku radioaktivních látek a ionizujícího záření do životního prostředí.

5.2 HAVÁRIE TYPU LOCA [13, 14, 15]

V případě prasknutí větve primárního okruhu dojde k náhlému poklesu tlaku v potrubí. Zároveň chladicí médium uniká z větve primárního okruhu, což znamená, že jaderný reaktor nemůže být dostatečně chlazen. Tomuto typu havárie se říká LOCA. Projekt AP1000 řeší havárii typu LOCA skrze pasivní systém chlazení aktivní zóny.

Principiální řešení havárie LOCA pomocí pasivního systému:

5.2.1 Kompenzátor objemu [13, 14, 15]

Při prasknutí potrubí primárního okruhu jako první reaguje kompenzátor objemu (obr. 5.3), tak že se snaží vyrovnat chybějící množství chladiva v primárním okruhu, které uniklo v důsledku prasknutí potrubí primárního okruhu, a také tlak chladiva. Chladivo je z

kompenzátoru objemu dodáváno do primárního okruhu díky tlaku páry, kterým je vyplněn prostor nad hladinou v kompenzátoru objemu. Kompenzátor objemu je připojen na horké větvi, která spojuje reaktor a parogenerátor.



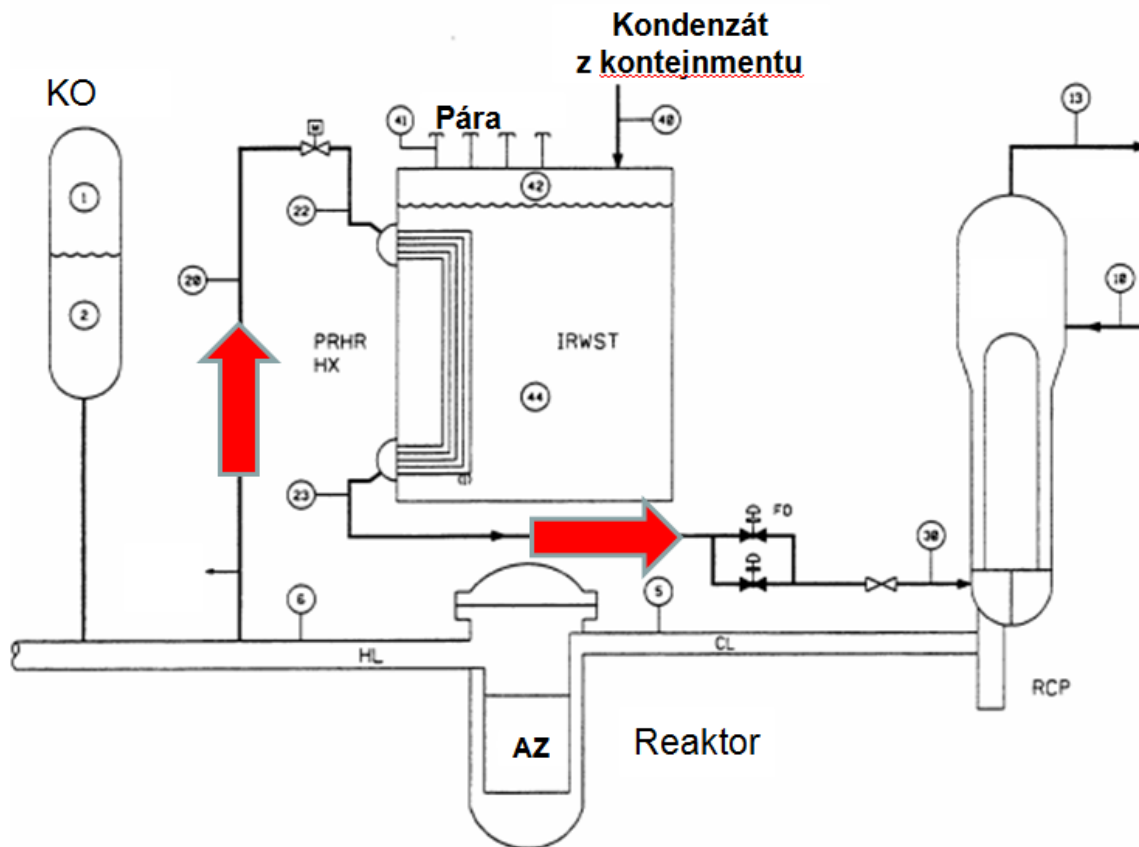
Obr. 5.3 Kompenzátor objemu AP1000 [10]

5.2.2 CMT (vysokotlaké doplňování) [13, 14, 15]

CMT jsou uvedeny v činnost v případě, že již nefungují žádné klasické způsoby chlazení aktivní zóny. To znamená, že jsou vypnuty hlavní cirkulační čerpadla a zároveň se studená větev primárního okruhu začne nepřipustně zahřívat. Druhou podmínkou pro uvedení CMT v činnost je, že hladina chladiva v kompenzátoru klesne na určitou úroveň. Reaktor je vybaven dvěma CMT, které jsou naplněny bórovou vodou (má stejné složení jako chladicí médium). Oba CMT jsou napojeny na potrubí doplňování přímo do reaktoru (tzv. DVI – direct vessel injection). CMT funguje pouze na základě gravitace a rozdílu teplot a tlaků.

5.2.3 Odvod zbytkového tepla [13, 14, 15]

Současně se spuštěním CMT je spuštěn systém odvodu zbytkového tepla z aktivní zóny. Odvod zbytkového tepla je zajištěn pomocí výměníku tepla (PRHR HX), který je umístěn přímo v IRWST. Schéma zapojení havarijního výměníku je na obr. PRHR HX se aktivuje v případě, kdy není možný klasický odvod tepla z primárního okruhu pomocí parogenerátorů. Teplá strana PRHR HX je napojena na horkou větev, na kterou je napojen i kompenzátor objemu a odvádí horkou vodu do PRHR HX, zde se ochladí a již ochlazená proudí do parogenerátoru. Potrubí je napojené na primární okruh a je oddělené pomocí armatur, které jsou za běžného provozu zavřeny. Armatury jsou otevřeny na základě signálu od měřicích a kontrolních systémů, tedy když jsou překročeny určené parametry tlaku a teploty v potrubí primárního okruhu. Médium ve smyčce tepelného výměníku proudí zcela přirozeně díky rozdílným teplotám a výškovému umístění vstupu horké vody a výstupu studené vody.



Obr. 5.4 Schéma zapojení havarijního výměníku (PRHR HX) [1]

5.2.4 Čtyřstupňové odtlakování systému [13, 14, 15]

Odtlakování systému nastane v případě poklesu hladiny v CMT na určitou úroveň. Třístupňové snižování tlaku probíhá tak, že na kompenzátor objemu jsou napojena tři potrubí každé s třemi paralelně zapojenými armaturami. Následně je potrubí zaústěno do IRWST. Armatury jsou umístěny nad kompenzátorem objemu. Na horkou větev PRHR HX je ještě napojen čtvrtý stupeň odtlakování (dvě potrubí, každé s dvěma armaturami), který se aktivuje v případě, že hladina chladicího média poklesne v CMT na 20 % původního objemu. Čtvrtý stupeň dekomprese je opatřen tzv. rozbuškovými ventily, které jsou otevírány rozbuškou. Čtvrtý stupeň odtlakování snižuje tlak, aby mohlo dojít k chlazení aktivní zóny gravitačním spádem z IRWST, přičemž potrubí ústí do volného prostoru v kontejmentu. Automatický odtlakovací systém umožňuje další chlazení aktivní zóny systémy pracující na nižším tlaku a dlouho trvající chlazení pomocí IRWST a jímky kontejmentu (na obr. 4.1.4.2 - Sump). Systém automatického odtlakování je 2x100 % redundantní. Jedná o částečně aktivní systém, jelikož ventily jsou poháněny motorem.

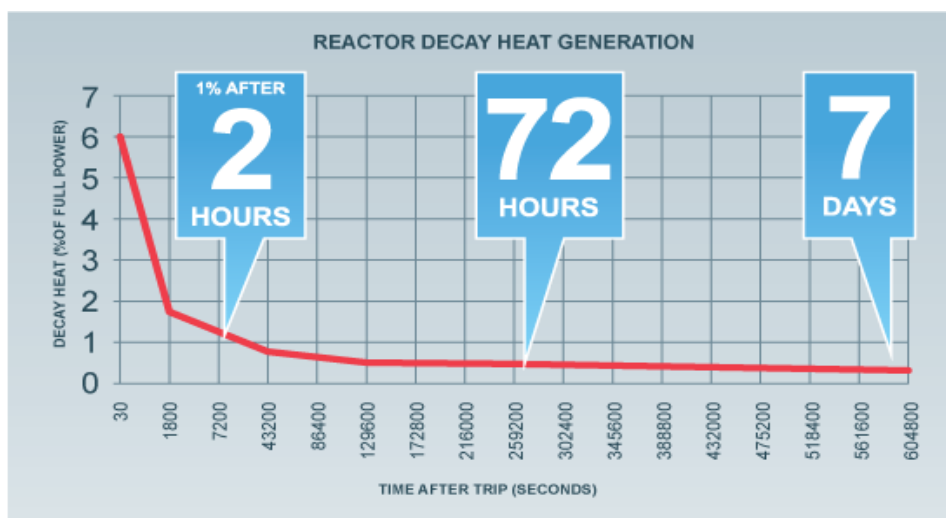
5.2.5 Hydroakumulátory (středotlaké doplňování) [13, 14, 15]

Před aktivováním čtvrtého stupně odtlakování je aktivován středotlaký systém doplňování chladiva pomocí hydroakumulátorů. Hydroakumulátory jsou natlakovány na tlak 4,826 MPa plynem na bázi dusíku a jsou napojeny na potrubí vedoucí ze CMT do reaktoru. Hydroakumulátory začnou pracovat ve chvíli, kdy poklesne tlak v potrubí mezi CMT a reaktorem na takovou hodnotu, že se tlakem plynu v hydroakumulátorech otevřou zpětné klapky. Po otevření zpětných klapek proudí chladivo z hydroakumulátorů do reaktoru, čímž chladí aktivní zónu. Jakmile je chladivo z hydroakumulátorů vyčerpáno, aktivuje se čtvrtý stupeň automatické dekomprese a systém chlazení aktivní zóny pomocí IRWST.

5.2.6 IRWST (nizkotlaké doplňování chladiva) [13, 14, 15]

IRWST je poměrně velká nádrž (2100m^3) používaná na výměnu paliva, jež je umístěná v kontejmentu nad smyčkami primárního okruhu a nad systémem havarijního chlazení reaktoru. IRWST není natlakovaná, tzn. na hladině je atmosférický tlak. Proto je zařazen jako poslední systém havarijního chlazení aktivní zóny jako nizkotlaké doplňování chladiva. Z IRWST proudí chladivo až po té, co je vyčerpáno z hydroakumulátorů a je aktivován čtvrtý stupeň automatické dekomprese. V případě, kdy je tlak v potrubí blízký atmosférickému tlaku, začne proudit chladicí médium gravitačním spádem do reaktoru. Potrubí vedoucí z IRWST je napojeno na potrubí vedoucí ze CMT do reaktoru. Na potrubní trasu IRWST – reaktor je napojeno potrubí vedoucí z jímky kontejmentu, které dodává další chladivo do systému. Jedná se o poslední stupeň dodávání chladiva k chlazení aktivní zóny. Při tomto stupni je část kontejmentu zaplavena. Horká voda proudící do IRWST vytváří bubliny horké radioaktivní páry, které směřují k hladině, kde se uvolní do volného prostoru kontejmentu a zároveň zahřívá vodu v IRWST. Dále je v IRWST umístěn PRHR HX, který vodu v IRWST rovněž zahřívá. Díky tomu se voda vypařuje, což má za následek její úbytek. Tento úbytek je vyřešen systémem pasivního chlazení kontejmentu. Díky tomuto systému pára v kontejmentu kondenzuje a stéká po stěnách kontejmentu zpět do IRWST. Systém chlazení kontejmentu je v činnosti během všech popsaných operací.

5.3 VÝPADEK PROUDU - BLACK OUT [1, 5, 21, 22, 23]

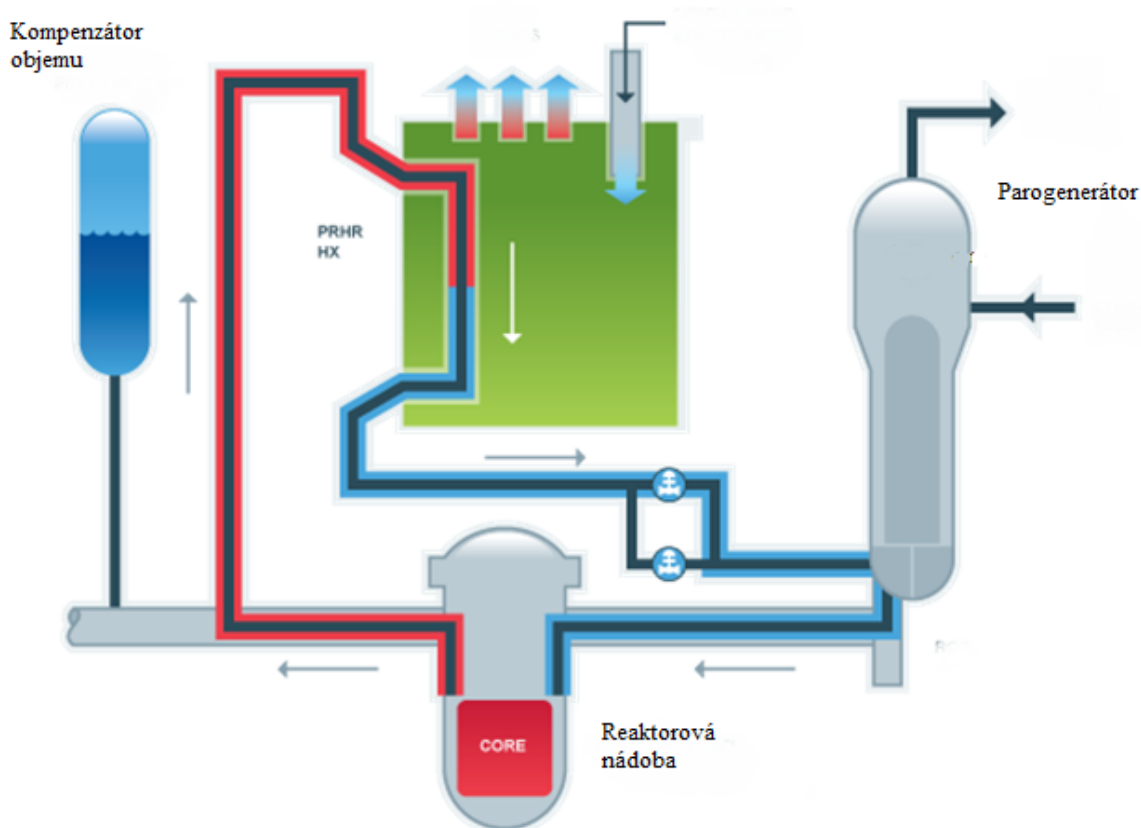


Obr. 5.3 Znázornění vývinu zbytkového tepla reaktoru po odstavení [21]

V okamžiku blackoutu se jaderná elektrárna náhle ocitá bez dodávky elektrického proudu a pohotovostní diesela agregáty se nedaří spustit. Dochází k plnému zasunutí regulačních tyčí a dochází k odstavení reaktoru.

Po 2 minutách

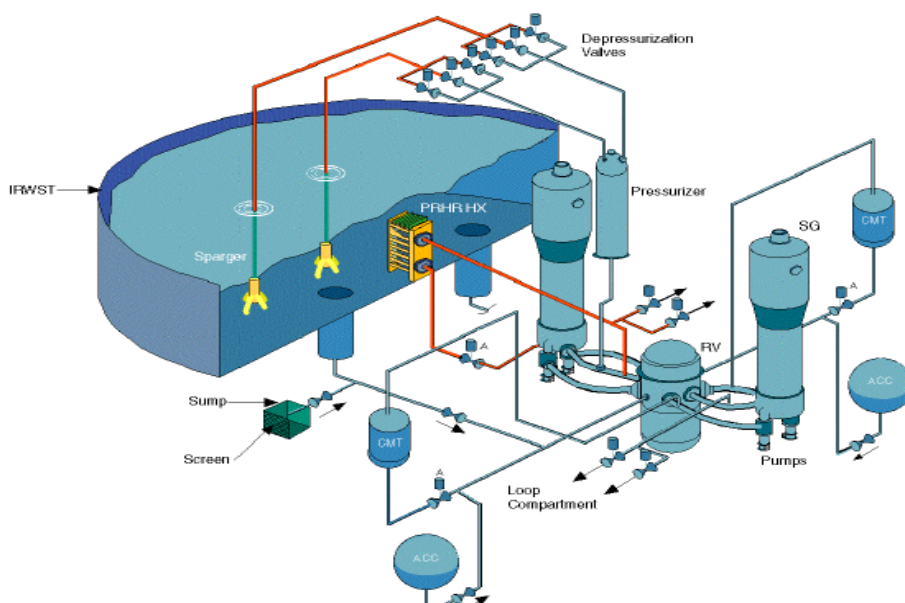
Hladina vody v parogenerátoru klesá, aktivuje se systém pasivního chlazení aktivní zóny reaktoru. Chladivo cirkuluje přes pasivní výměník tepla PRHR HX, jenž funguje na základě rozdílů hustoty mezi horkou a studenou vodou (přirozená cirkulace).



Obr 5.4 Schéma zapojení havarijního výměníku (PRHR HX) [23]

Po 5 hodinách

Pasivní výměník tepla PRHR HX převedl zbytkové teplo z reaktoru do nádrže IRWST. Voda uvnitř nádrže začíná vařit a pára zaplňuje vnitřní prostor kontejmentu.

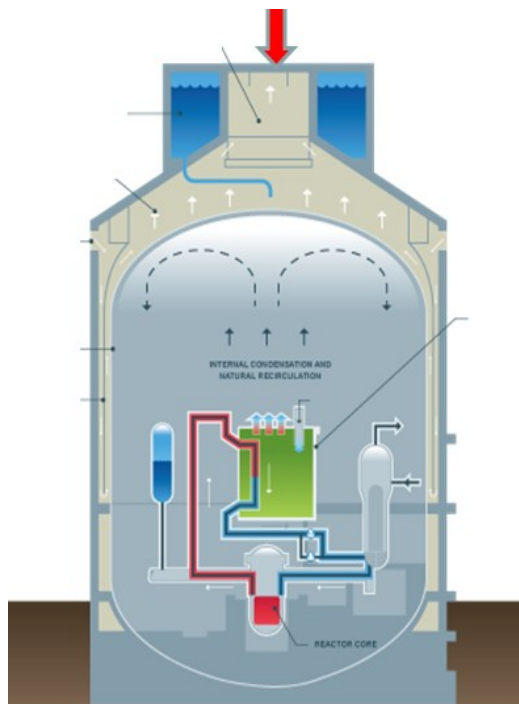


Obr. 5.5 Schéma okruhu s IRWST a PRHR HX [23]

Po 6-7 hodinách

Monitorovacího systému zjistí, že je nutné zajistit chlazení kontejmentu. Systém otevře ventily průtoku chladicí vody z nádrže, která se nachází na střeše. Voda následně stéká samospádem na horní část ocelového kontejmentu a začíná ho ochlazovat.

Vznikající pára přenáší teplo na vnitřní ocelovou stěnu, kde nastává kondenzace. Pára kondenzuje a stéká dolů do nádrže pro opětovné využití k chlazení. Tento průběžný cyklus chlazení je tak časově neomezen.



Obr 5.6 Kondenzace páry na stěnách kontejmentu [23]

Po 72 hodinách

Operátor uvede do provozu vedlejší dieselgenerátory k výrobě elektrické energie, pro zajištění monitoringu, příkon čerpadel a osvětlení. Čerpadla jsou využita k vyčerpání vody z vnější nádrže do horní nádrže kontejmentu a vnitřních nádrží kontejmentu jako IRWST a nádrže vyhořelého paliva.

6. PEVNOSTNÍ VÝPOČET A KONTROLA [3, 4, 9]

6.1 PEVNOSTNÍ KONTROLA TRUBEK

Výpočet tloušťky stěny trubek výměníku PRHR HX se provádí pro statické namáhání od vnitřního přetlaku dle ČSN 690010 [3,4] Teplosměnné trubky jsou vyrobeny z materiálu 10GN2MFA.

Z konstrukčních parametrů výměníku je zadáný tlak havarijního okruhu :

$$P = 17,1 [\text{MPa}]$$

Zeslabení stěny účinkem koroze se uvažuje $c = 0,0005$ [m]

Chemické složení 10GN2MFA:

	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Al
min.	0,08	0,80	0,17	-	-	-	1,80	-	0,40	0,03	-	0,005
max.	0,12	1,10	0,37	0,008	0,005	0,30	2,30	0,30	0,70	0,07	0,015	0,035

Tab.6.1: Směrné chemické složení oceli 10GN2MFA

Mechanické vlastnosti 10GN2MFA

- mez kluzu v tahu $R_e = 290 - 480$ [MPa]
- mez pevnosti v tahu $R_m = 500 - 650$ [MPa]

Minimální dovolené napětí při součiniteli bezpečnosti k mezi kluzu $k_k = 1,5$

$$\sigma_{D\min} = \frac{R_e}{k_k} \quad (1)$$
$$\sigma_{D\min} = \frac{330}{1,5} = 220 [\text{MPa}]$$

Výpočtová tloušťka stěny přímé trubky

$$s = \left(\frac{P \cdot d_1}{2 \cdot \sigma_{D\min} + P} \right) + c \quad (2)$$
$$s = \left(\frac{17,1 \cdot 0,0223}{2 \cdot 220 + 17,1} \right) + 0,0005 = 0,0013 [\text{m}]$$

Tlak pro hydraulickou zkoušku

Pro hydraulickou zkoušku se požaduje zvýšený tlak a jeho hodnota je:

$$P_H = 1,25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{Dt,z}}{\sigma_{Dt,d}} \quad (3)$$
$$P_H = 1,25 \cdot 17,1 \cdot \frac{230}{213} = 23,1 [MPa]$$

Hodnota $\sigma_{Dt,z}$ je dovolené napětí materiálu v tahu, při teplotě zkoušky $t = 20 [^{\circ}C]$

- mez kluzu v tahu $Re = 345 [MPa]$

$$\sigma_{Dt,z} = \frac{Re}{k_k} \quad (4)$$
$$\sigma_{Dt,z} = \frac{345}{1,5} = 230 [MPa]$$

Volím součinitel meze kluku $k_k = 1,5$

Stejným způsobem se určí hodnota napětí materiálu v tahu, při teplotě teplosměnitelů $t = 195 [^{\circ}C]$

- mez kluzu v tahu $Re = 320 [MPa]$

$$\sigma_{Dt,d} = \frac{Re}{k_k} \quad (5)$$
$$\sigma_{Dt,d} = \frac{320}{1,5} = 213 [MPa]$$

Volím součinitel meze kluku $k_k = 1,5$

Dovolené napětí materiálu v tahu při teplotě zkoušky

$$\sigma_{Dmin} = \frac{Re}{k_k} \quad (6)$$
$$\sigma_{Dmin} = \frac{320}{1,5} = 213 [MPa]$$

Tloušťka pro hydraulickou zkoušku

$$s = \left(\frac{P_H \cdot d_1}{2 \cdot \sigma_{min} + P_H} \right) + c \quad (7)$$
$$s = \left(\frac{23,1 \cdot 0,0223}{2 \cdot 213 + 23,1} \right) + 0,0005 = 0,0017 [m]$$

Tloušťka stěny na vnitřní straně oblouku

$$s_0 = s \cdot B$$

$$B = 1,22$$

(8)

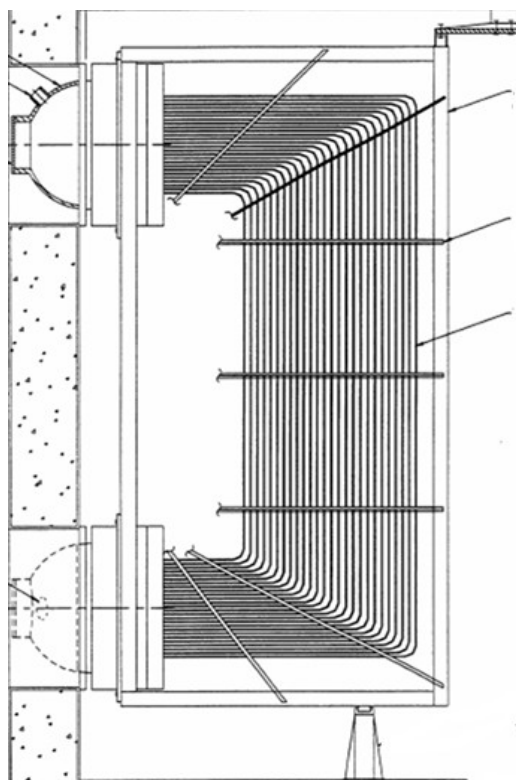
$$s_0 = 1,7 \cdot 1,22 = 2,1 [\text{mm}] = 0,0021 [\text{m}]$$

$$2,1 [\text{mm}] \leq 2,3 [\text{mm}] \rightarrow \text{tloušťka stěny vyhovuje}$$

Pro konstrukci trubek v havarijním výměníku je volena tloušťka stěny 2,3 [mm], z důvodu namáhání materiálu, zvýšené eroze v ohybech a bezpečnosti, je tloušťka stěny trubek vyšší, než vypočítána.

6.2 KONSTRUKCE

Konstrukce výměníků je patrná ze schématu na obr. 6.1. Výměník havarijního dochlazování je konstruován, jako trubkový výměník tvaru C. Ke sdílení tepla dochází v tzv. trubkovém svazku, což je svazek mnoha tenkých trubek. Trubky svazku jsou na okrajích připevněny do trubkovnic. Trubkovnice jsou masivní kruhové děrované desky. Trubky jsou pomocí podpěr, přivařených na podpůrné kostře z profilů I, chráněny před vibracemi. Konstrukce výměníku umožňuje volnou teplotní dilataci trubkového svazku. Hrdla () pro vstup a výstup chladicí vody. Výměník je uchycen na podporách umožňující volnou teplotní dilataci výměníku.



Obr. 6.1 Schéma výměníku havarijního dochlazování

7. TEPELNÝ VÝPOČET [3, 4, 9]

7.1 POPIS VÝMĚNÍKŮ

Tepelný výpočet se provádí pro výměník havarijního dochlazování jaderného reaktoru. Jedná se o trubkový výměník typu Shell & Tube, voda-voda. Je vyroben z oceli 10GN2MFA, rozebíratelné konstrukce. Teplosměnná plocha je tvořena z 689 trubek. V hladkých trubkách Tr026,9x2,3 protéká voda z primárního okruhu, která je zde chlazená. Délka střední trubky je 11530 mm. Šířka výměníku je 5850 mm, výška výměníku je 7184 mm.

Základní vztahy a konstanty pro výpočty vycházejí z [1], [3], [4]

Parametry médií

Médium	Vstup[° C]	Výstup[°C]
Chlazené	297	93
Ohříváné	50	-

Média

Ohříváné - voda v nádrži - 2100 [m³]

Hmotnostní tok vody výměníkem

$$\dot{m} = 63,3 [kg \cdot s^{-1}]$$

7.2 STRANA CHLAZENÉHO MÉDIA UVNITŘ TRUBEK

Teplosměnnou plochu chlazeného média tvoří 689 trubek o rozměru 26,9x2,3 [mm].

Průtočná plocha chlazeného média

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot n [m^2] \quad (9)$$
$$S_1 = \frac{\pi \cdot 0,0223^2}{4} \cdot 689 = 0,269 [m^2]$$

- kde n je počet trubek

Střední teplota vody chlazeného média

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} [^{\circ}C]$$
$$t_{st} = \frac{297 + 93}{2} = 195 [^{\circ}C]$$
(10)

Fyzikální vlastnosti chlazeného média

$$c_p = 4,47 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$
$$\lambda = 0,67 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$
$$\nu = 0,166 \cdot 10^{-6} [m^2 \cdot s^{-1}]$$
$$\rho = 870 [kg \cdot m^{-3}]$$

Rychlost proudění chlazeného média v trubce

$$\dot{w} = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot S_1} [m \cdot s^{-1}]$$
$$\dot{w} = \frac{63,3}{870 \cdot 0,269} = 0,27 [m \cdot s^{-1}]$$
(11)

Výpočet tepelného výkonu chlazeného média

$$\dot{Q}_1 = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{12} - t_{11}) [W]$$
$$\dot{Q}_1 = 63,3 \cdot 4,47 \cdot 10^3 \cdot (297 - 93) = 57722004 [W]$$
(12)

Reynoldsovo kritérium chlazeného média

$$Re = \frac{\dot{w} \cdot d_1}{\nu} [1]$$
$$Re = \frac{0,27 \cdot 0,0223}{0,166 \cdot 10^{-6}} = 36271 [1]$$
(13)

Součinitel teplotní vodivosti chlazeného média

Charakterizuje rychlost vyrovnání teplot při nestacionárním vedení tepla.

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} [m^2 \cdot s^{-1}]$$
$$a = \frac{0,67}{4,47 \cdot 10^3 \cdot 870} = 1,72 \cdot 10^{-7} [m^2 \cdot s^{-1}]$$
(14)

Prandtlovo kritérium chlazeného média

$$Pr_1 = \frac{\nu}{a} [1]$$
$$Pr_1 = \frac{0,166 \cdot 10^{-6}}{1,72 \cdot 10^{-7}} = 0,96 [1]$$
(15)

Nusseltovo kritérium chlazeného média

Pro rozvinuté turbulentní proudění v trubce kruhového průřezu bez zřetele na směr tepelného toku je nejlépe možno stanovit hodnotu Nusseltova kritéria na základě Kraussoldovy rovnice, pro $Re \geq 10^4$ a $Pr = 0,7$ až 2500 pak platí:

$$Nu_1 = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} [1]$$
$$Nu_1 = 0,023 \cdot 36271^{0,8} \cdot 0,96^{0,33} = 100,82 [1]$$
(16)

Při proudění v zahnutých trubkách dochází vlivem odstředivé síly k pohybu částic kapaliny k vnější straně trubky. Následně dochází k zvýšení turbulence, tvorbě vírů, jenž ovlivňují přestup tepla, na rozdíl od proudění ve vodorovné trubce. Z toho důvodu musíme do výpočtu zahrnout součinitel křivosti ε .

Součinitel přestupu tepla na straně chlazeného média

$$\alpha_1 = \frac{\varepsilon \cdot \lambda \cdot Nu_1}{d_1} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$
$$\alpha_1 = \frac{1,1 \cdot 0,67 \cdot 100,82}{0,0223} = 3332 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (17)$$

$$\varepsilon = 1,1$$

7.3 STRANA OHŘÍVANÉHO MÉDIA V BAZÉNU

Fyzikální vlastnosti ohřivaného média

$$c_p = 4,47 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$
$$\lambda = 0,67 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$
$$\nu = 0,166 \cdot 10^{-6} [m^2 \cdot s^{-1}]$$
$$\rho = 870 [kg \cdot m^{-3}]$$
$$\gamma = 6,7 \cdot 10^{-4} [K^{-1}]$$
$$Pr_s = 2,1 [1]$$

Střední teplota mezi stěnou trubky a ohřivaného média

$$t_{spt} = \frac{t_{sts} + t_b}{2} [^{\circ}C]$$
$$t_{spt} = \frac{122,5 + 50}{2} = 86,25 [^{\circ}C] \quad (18)$$

Grashoffovo kritérium pro ohřivané médium

$$Gr = \gamma \cdot (t - t_b) \frac{g \cdot L^3}{\nu} [1]$$
$$Gr = 6,7 \cdot 10^{-4} \cdot (122,5 - 50) \cdot \frac{9,81 \cdot 4,74^3}{(0,346 \cdot 10^{-6})^2} = 4,239 \cdot 10^{14} [1] \quad (19)$$

L-charakteristický rozměr je zde výška středních trubek 4,74m [9]

Nusseltovo kritérium pro ohřívání médium

$$Nu_2 = 0,135 \cdot (\text{Pr} \cdot Gr)^{\frac{1}{3}} [1] \quad (20)$$

$$Nu_2 = 0,135 \cdot (2,1 \cdot 4,239 \cdot 10^{14})^{\frac{1}{3}} = 12986,6 [1]$$

Součinitel přestupu tepla pro ohřívání médium

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_s \cdot Nu_s}{d_1} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (21)$$

$$\alpha_2 = \frac{0,678 \cdot 12986,6}{0,0269} = 327320,3 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

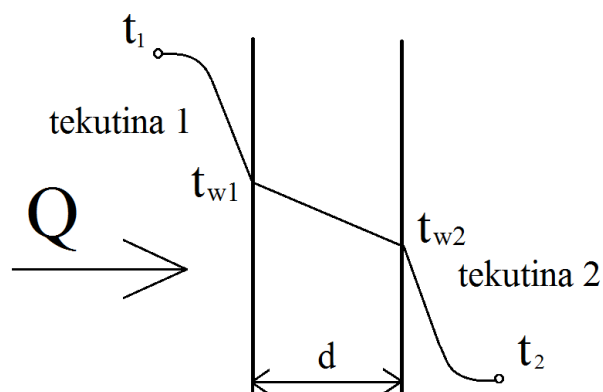
Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} [^{\circ}C] \quad (22)$$

$$\Delta t = \frac{(297 - 50) - (86,25 - 50)}{\ln \frac{297 - 50}{86,25 - 50}} = 109,83 [^{\circ}C]$$

Součinitel prostupu tepla

Pokud máme na mysli přenos tepla z jedné tekutiny do druhé přes nějakou pevnou přepážku (např. přes stěnu trubky), pak hovoříme o prostupu tepla. Na obr. 7.1 je schematicky znázorněna taková situace.



Obr. 7.1 Přestup tepla rovinou stěnou

Horké médium je odděleno od studeného média pevnou rovinnou stěnou. Tepelný tok je přenášen postupně konvekcí z horké tekutiny, jejíž teplota je t_1 do povrchu stěny s teplotou t_{w1} , pak vedením stěnou a opět konvekcí z druhého povrchu stěny o teplotě t_{w2} do studené tekutiny o teplotě t_2 . [5diplomka VUT Jaderna bezpečnost]

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} + \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_2}} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{3332 \cdot 0,01115} + \frac{1}{37,1} \cdot \ln \frac{0,01345}{0,01115} + \frac{1}{327320,3 \cdot 0,01345}} \quad (23)$$

$$k = 195,14 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Měrný tepelný tok

$$q = k \cdot \Delta t [W \cdot m^{-1}]$$

$$q = 195,14 \cdot 109,83 = 21432,23 [W \cdot m^{-1}] \quad (24)$$

Teploty stěn trubek

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot (t - t_s)}{\frac{1}{\alpha \cdot r}}$$

$$t_{s1} = t_1 - \frac{q}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} = 195 - \frac{21432,23}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{3332 \cdot 0,01115} = 103,19 [^{\circ}C] \quad (25,26,27)$$

$$t_{s2} = t_2 + \frac{q}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_2} = 50 + \frac{21432,23}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{327320,3 \cdot 0,01345} = 50,78 [^{\circ}C]$$

Výpočet minimální délky trubek

$$S = \frac{m_s \cdot c_{ps} \cdot (t_1 - t_2)}{k \cdot \Delta t} [m] \quad (28)$$

$$S = \frac{63,3 \cdot 10^3 \cdot 4,18 \cdot (297 - 93)}{195,14 \cdot 109,83} = 2520,3 [m]$$

Počet trubek

$$Tr = \frac{S}{l} \quad [1] \quad (29)$$

$$Tr = \frac{2520,3}{3,66} = 688,52 \Rightarrow 689[1]$$

8. TEPLITNÍ VÝPOČET II. PŘIBLÍŽENÍ [3, 4, 9]

Určující teplota média ve výměníku II

$$t_{stII} = \frac{t_{st} + t_{s1}}{2} [^{\circ}C]$$
$$t_{stII} = \frac{195 + 103,19}{2} = 149,1 [^{\circ}C] \quad (30)$$

Výpočet Nusseltova kritéria II

$$Nu_s = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} [1]$$
$$Nu_s = 0,023 \cdot 36271^{0,8} \cdot 1,17^{0,33} = 107,62 [1] \quad (31)$$

$$Pr = 1,17$$

-pro teplotu 149,1°C

Určující teplota vody nádrže II

$$t_{spt} = \frac{t_b + t_{2t}}{2} [^{\circ}C]$$
$$t_{spt} = \frac{50 + 50,78}{2} = 50,39 [^{\circ}C] \quad (32)$$

$$Pr = 3,53$$

-pro teplotu 50,39

Střední hodnota Nusseltova kritéria II

$$Nu_{st} = \frac{Nu + Nu}{2} [^{\circ}C]$$
$$Nu_{st} = \frac{297 + 93}{2} = 195 [^{\circ}C] \quad (33)$$

Součinitel přestupu tepla II

$$\alpha_s = \frac{\lambda_s \cdot Nu_s}{d_1} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$
$$\alpha_s = \frac{0,678 \cdot 73,7}{0,0269} = 1857,6 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (34)$$

Určení součinitele přestupu tepla z vody nádrže do potrubí II

$$t_{st} = \frac{t_{1t} + t_{2t}}{2} [^{\circ}C]$$
$$t_{st} = \frac{297 + 93}{2} = 195 [^{\circ}C] \quad (35)$$

Fyz vlastnosti vody:

Určení charakteru proudění II

$$Pr=2,1$$

$$Nu_s = 0,135 \cdot (Pr \cdot Gr)^{\frac{1}{3}} [1]$$
$$Nu_s = 0,135 \cdot (2,1 \cdot 77479437,5)^{\frac{1}{3}} = 73,7 [1] \quad (36)$$

Součinitel přestupu tepla z trubky do vody bazénu II

$$\alpha_s = \frac{\lambda_s \cdot Nu_s}{d_1} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$
$$\alpha_s = \frac{0,678 \cdot 73,7}{0,0269} = 1857,6 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (37)$$

Výpočet Grashoffova kritéria II

$$Gr = \gamma \cdot (t - t_s) \frac{g \cdot d_1^3}{\nu} [1]$$
$$Gr = 6,7 \cdot 10^{-4} \cdot (122,5 - 50) \cdot \frac{9,81 \cdot 0,0269^3}{(0,346 \cdot 10^{-6})^2} = 77479437,5 [1] \quad (38)$$

Sučinitel přestupu tepla II

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\alpha \cdot r} + \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r}{r} + \frac{1}{\alpha \cdot r}} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (39)$$
$$k = \frac{2 \cdot \pi}{10,322 \cdot 10^{-5} + 3,049 \cdot 10^{-5} + 3,386 \cdot 10^{-5}} = 5967 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

9. HYDRAULICKÝ VÝPOČET [3, 4]

Trubky v nichž proudí voda jsou z materiálu 10GN2MFA. Trubky TR 26,9 x 2,3 délka se liší dle uspořádání. Pro výpočet bereme délku středové trubky 11 530mm.

Místní ztráta na vstupu do trubek

Plocha průřezu

$$S_3 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} [m^2]$$
$$S_3 = \frac{\pi \cdot 0,0223^2}{4} = 0,000391 [m^2]$$
(40)

kde d_2 vnitřní průměr trubky TR 26,9x2,3

Rychlost na vstupu do trubek

$$\dot{w}_2 = \frac{m_1}{h \cdot \rho_1 \cdot S_3} [m \cdot s^{-1}]$$
$$\dot{w}_2 = \frac{63,3}{689 \cdot 870 \cdot 0,000391} = 0,27 [m \cdot s^{-1}]$$
(41)

kde h je počet trubek havarijního výměníku

Místní ztráta na vstupu do trubek

Součinitel odporu je $\xi_2 = 0,1 [1]$

$$\Delta p_{z1} = \xi_2 \cdot \frac{\dot{w}_2^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa]$$
$$\Delta p_{z1} = 0,1 \cdot \frac{0,27^2}{2} \cdot 870 = 3,17 [Pa]$$
(42)

Třecí ztráta v trubkách

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{\dot{w} \cdot d_2}{\nu} [1]$$
$$Re = \frac{0,27 \cdot 0,0223}{0,166 \cdot 10^{-6}} = 36271 [1]$$
(43)

kde ν je kinematická viskozita vody při teplotě 195[°C] což je střední teplota vody v havaryjním výměníku

Součinitel tření

Výpočet podle Hermanna pro izotermní turbulentní proudění v hladkých kanálech.[7]Mašek

$$\begin{aligned}\lambda_2 &= 0,0054 \cdot 0,369 \cdot \text{Re}^{-0,3} [1] \\ \lambda_2 &= 0,0054 \cdot 0,369 \cdot 36271^{-0,3} = 0,0000854 [1]\end{aligned}\quad (44)$$

Tlaková ztráta v trubkách

Třením

$$\begin{aligned}\Delta p_{z2} &= \lambda_2 \cdot \frac{l_2}{d_2} \cdot \frac{\dot{w}_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa] \\ \Delta p_{z2} &= 0,0000854 \cdot \frac{3,39}{0,0223} \cdot \frac{0,27^2}{2} \cdot 870 = 0,412 [Pa]\end{aligned}\quad (45)$$

kde l_2 je délka trubky

Místní ztráta v ohybu 1

Součinitel odporu je $\xi_4 = 0,1 [1]$

$$\begin{aligned}\Delta p_{z3} &= \xi_4 \cdot \frac{\dot{w}_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa] \\ \Delta p_{z3} &= 0,1 \cdot \frac{0,27^2}{2} \cdot 870 = 3,17 [Pa]\end{aligned}\quad (46)$$

Třecí ztráta v trubkách

Reynoldsovo číslo

$$\begin{aligned}\text{Re} &= \frac{\dot{w}_3 \cdot d_2}{\nu} [1] \\ \text{Re} &= \frac{0,27 \cdot 0,0223}{0,166 \cdot 10^{-6}} = 36271 [1]\end{aligned}\quad (47)$$

kde ν je kinematická viskozita vody při teplotě 195[°C] což je střední teplota vody

Součinitel tření

Výpočet podle Hermanna pro izotermní turbulentní proudění v hladkých kanálech.

$$\begin{aligned}\lambda_2 &= 0,0054 \cdot 0,369 \cdot \text{Re}^{-0,3} [1] \\ \lambda_2 &= 0,0054 \cdot 0,369 \cdot 36271^{-0,3} = 0,0000854 [1]\end{aligned}\tag{48}$$

Tlaková ztráta v trubkách

Třením

$$\begin{aligned}\Delta p_{z4} &= \lambda_2 \cdot \frac{l_2}{d_2} \cdot \frac{\dot{w}_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa] \\ \Delta p_{z4} &= 0,0000854 \cdot \frac{4,74}{0,0223} \cdot \frac{0,27^2}{2} \cdot 870 = 0,576 [Pa]\end{aligned}\tag{49}$$

kde l_2 je délka trubky

Místní ztráta v ohybu 2

Součinitel odporu je $\xi_5 = 0,1 [1]$

$$\begin{aligned}\Delta p_{z5} &= \xi_5 \cdot \frac{\dot{w}_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa] \\ \Delta p_{z5} &= 0,1 \cdot \frac{0,27^2}{2} \cdot 870 = 3,17 [Pa]\end{aligned}\tag{50}$$

Třecí ztráta v trubkách

Reynoldsovo číslo

$$\begin{aligned}\text{Re} &= \frac{\dot{w}_3 \cdot d_2}{\dot{\nu}} [1] \\ \text{Re} &= \frac{0,27 \cdot 0,0223}{0,0166 \cdot 10^{-6}} = 36271 [1]\end{aligned}\tag{51}$$

kde $\dot{\nu}$ je kinematická viskozita vody při teplotě 195[°C] což je střední teplota vody

Součinitel tření

Výpočet podle Hermanna pro izotermní turbulentní proudění v hladkých kanálech.[7]Mašek

$$\begin{aligned}\lambda_2 &= 0,0054 \cdot 0,369 \cdot \text{Re}^{-0,3} [1] \\ \lambda_2 &= 0,0054 \cdot 0,369 \cdot 36271^{-0,3} = 0,0000854 [1]\end{aligned}\tag{52}$$

Tlaková ztráta v trubkách

Třením

$$\Delta p_{z6} = \lambda_2 \cdot \frac{l_2}{d_2} \cdot \frac{\dot{w}_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa]$$
$$\Delta p_{z6} = 0,0000854 \cdot \frac{3,39}{0,0223} \cdot \frac{0,27^2}{2} \cdot 870 = 0,412 [Pa]$$
(53)

kde l_2 je délka trubky

Místní ztráta na výstupu z trubek

Místní odpor pro trubku na výstupu je $\xi_3 = 0,001 [1]$

Místní odpor pro 689 trubek je :

$$\Sigma \xi = 689 \cdot \xi_3 [1]$$
$$\Sigma \xi = 689 \cdot 0,001 = 0,689 [1]$$
(54)

Tlaková ztráta na výstupu

$$\Delta p_{z7} = \Sigma \xi \cdot \frac{\dot{w}_3^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa]$$
$$\Delta p_{z7} = 0,689 \cdot \frac{0,27^2}{2} \cdot 870 = 21,85 [Pa]$$
(55)

Celková tlaková ztráta systému

$$\Delta p_{zC} = \Delta p_{z1} + \Delta p_{z2} + \Delta p_{z3} + \Delta p_{z4} + \Delta p_{z5} + \Delta p_{z6} + \Delta p_{z7} [Pa]$$
$$\Delta p_{zC} = 3,17 + 0,412 + 3,17 + 0,576 + 3,17 + 0,412 + 21,85 = 32,76 [Pa]$$
(56)

Celková ztráta havarijního výměníku je 32,76 [Pa]

10.ZÁVĚR

Na bezpečnostní systémy jaderné elektrárny jsou kladeny při projektování elektrárny vysoké nároky. Projekt AP1000 společnosti Westinghouse vyzdvihuje především pasívní ochranné systémy, které jsou schopny kontrolovat a udržovat elektrárnu v bezpečném stavu po určitou dobu, aniž by bylo třeba zásahu operátora. Nevýhoda pasivních bezpečnostních systémů je nemožnost v praxi je otestovat.

Havarijní výměník AP1000 je sestaven z 689 trubek o průměru 26,9mm, tloušťce 2,3mm a střední délkou trubek 11 530mm. Svařovaná ocelová konstrukce z profilu I, pomocí podpůrných trubek, slouží k podpoře trubek havarijního výměníku a umožňuje jejich teplotní dilataci, způsobenou teplotními rozdíly média. Pomocí havarijního výměníku chladíme zbytkový výkon tepla reaktoru při havarijním stavu. Tepelný výkon reaktoru 3415 MWt je v okamžiku havárie, pádem regulačních tyčí do aktivní zóny, snížen na 6% plného výkonu na hodnotu 204 MWt. Po 2 hodinách výkon klesá na 34 MWt a posléze po 72 hodinách kdy nádrž IRWST, začne vřít, je výkon reaktoru snížen již na 16MWt jenž je třeba trvale mařit chlazením.

V prvních 30 minutách se chladí reaktor z akumulčních nádrží, které jsou přetlakovány a posléze chladí jen havarijní výměník. Tyto věci vedly k zohlednění výpočtu a návrhu výměníku.

Pomocí teplotního výpočtu jsme ověřili potřebný výkon havarijního výměníku o hodnotě 58 MWt k potřebnému maření zbytkového výkonu tepla reaktoru.

11. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOLAT, P.: Úvod do jaderné energetiky, Skripta VŠB TU Ostrava, 2012
- [2] HEJZLAR, R.: Stroje a zařízení jaderných elektráren díl 1 a 2, ČVUT Praha, 2005
- [3] VÁLOVÝ, T.: Návrh olejového s vytápěním, Diplomová práce, VŠB TU Ostrava 2007
- [4] STONAWSKI, E.: Návrh vysokotlakého regeneračního výměníku a jeho optimalizace pro VVER 1000, Diplomová práce, VŠB TU Ostrava 2000
- [5] Dostupné z: <http://ap1000.westinghousenuclear.cz/>
- [6] Dostupné z: http://www.westinghousenuclear.com/docs/AP1000_brochure.pdf
- [7] Dostupné z: <http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/ap1000.html>
- [8] Westinghouse Electric Co., LLC, The Westinghouse AP1000 Advanced Nuclear Plant, 2003
- [9] KADLEC, Z.: Průvodce sdílením tepla, Skripta VŠB TU Ostrava, 2009
- [10] GAIO, P.: AP1000: the PWR Revisited, IAEA, 2009
- [11] dostupné z: http://artemis.osu.cz/mm fyz/jm/jm_2_3_3.htm
- [12] dostupné z: http://atomovejadro.wz.cz/stranky/jaderne_reakce_2.html
- [13] WAGNER, V. : Reaktory III. a IV. generace, 2008,
Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=3568>
- [14] AP1000 - Westinghouse Nuclear AP 1000 [online]. Dostupné z: https://www.ukap1000application.com/ap1000_at_a_glance.aspx
- [15] LANGER, K.: Relation between physical barriers and levels of protection in depth, Dostupné z: <http://www.iaea.org/ns/nusafe/tutorial/design/defdep3.htm>

- [16] Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/edu/technologie-a-zabezpeceni.html>
- [17] HANAHAN, K.: Prezentace Westinghouse AP1000 Design and Project Status, Ostrava, 2011
- [18] CUMMINS W.E., CORLETTI M.M., SCHULZ T.L.: Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant, Córdoba, Španělsko 2003
- [19] Dostupné z: <http://3pol.cz/448-prirozena-bezpecnost-jadernych-elektaren>
- [20] Jaderná bezpečnost – Zpětná vazba z provozních zkušeností. Dukovany (CZ): ČEZ, a.s., 2009
- [21] Materiály poskytl Prof. Ing. Kolat Pavel, DrSc.
- [22] Dostupné z: http://ap1000.westinghousenuclear.com/station_blackout_home/animations1.html
- [23] KOLAT, P: Výstavba dvou jaderných bloků v Temelíně, prezentace, 2012
- [24] Dostupné z: <http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/ap1000.html>

12.SEZNAM PŘÍLOH

Havarijní výměník AP1000

SN2ESZ01-1